

Elektriciteit aan Boord

(en andere omgevingen waar geen netstroom aanwezig is)

Versie 9
November 2012

Elektriciteit speelt een steeds grotere rol aan boord van jachten. Moderne navigatie en communicatie apparatuur zijn ervan afhankelijk, even als het toenemende aantal huishoudelijke apparaten dat aan boord wordt meegenomen.

De bedoeling van dit boek is tweeledig:

Ten eerste bespreek ik enkele onderwerpen waar vaak onduidelijkheid over bestaat, zoals accu's en het laden van accu's en het elektriciteitsverbruik van de apparatuur aan boord.

Ten tweede wil ik ontwerpers, elektriciens en jachteigenaren helpen bij de besluitvorming betreffende het opwekken en beheren van elektriciteit. Verscheidene nieuwe producten en concepten maken het mogelijk om meer te doen met elektriciteit aan boord, en de veiligheid en het comfort aanzienlijk te verhogen.

Reinout Vader

Het is niet toegestaan om deze publicatie of enig deel daarvan in enigerlei vorm, door enigerlei methode of voor enig doel te reproduceren.

VICTRON ENERGY B.V. MAKES NO WARRANTY, EITHER EXPRESSED OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, REGARDING VICTRON ENERGIE PRODUCTS AND MAKES SUCH VICTRON ENERGY PRODUCTS AVAILABLE SOLELY ON AN “AS-IS” BASIS.

IN NO EVENT SHALL VICTRON ENERGY B.V. BE LIABLE TO ANYONE FOR SPECIAL, COLLATERAL, INCIDENTAL, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES IN CONNECTION WITH OR ARISING OUT OF PURCHASE OR USE OF VICTRON ENERGIE PRODUCTS. THE SOLE AND EXCLUSIVE LIABILITY TO VICTRON ENERGY B.V., REGARDLESS OF THE FORM OF ACTION, SHALL NOT EXCEED THE PURCHASE PRICE OF THE VICTRON ENERGY PRODUCTS DESCRIBED HEREIN.

For conditions of use and permission to use this book for publication in other than the Dutch language, contact Victron Energy B.V.

Victron Energy B.V. reserves the right to revise and improve its products as it sees fit.

Victron Energy B.V.

De Paal 35
1351 JG Almere-Haven

P.O. Box 50016
1305 AA Almere-Haven

Tel : +31 (0)36 535 97 00
Fax : +31 (0)36 535 97 40

E-mail : sales@victronenergy.com
Website : www.victronenergy.com

Elektriciteit aan Boord (en andere omgevingen waar geen netstroom aanwezig is)

Inhoudsopgave

1. INLEIDING

2. DE ACCU: VROEGTIJDIGE VEROUDERING VOORKOMEN

De accu is het hart van elk kleinschalig energie systeem. Zonder accu kan er geen elektrische energie opgeslagen worden. Bovendien is de accu een kostbaar en kwetsbaar. Dit hoofdstuk gaat specifiek over de kwetsbaarheid van de accu.

2.1. Inleiding

2.2. De chemie van de accu

- 2.2.1. Wat gebeurt er in een cel tijdens het ontladen?
- 2.2.2. Wat gebeurt er tijdens het laden?
- 2.2.3. Het diffusieproces
- 2.2.4. De levensduur: massaverlies, corrosie, sulfatering

2.3. De meest voorkomende soorten loodzwavelzuur accu's

- 2.3.1. Loodantimoon en loodcalcium
- 2.3.2. Open en gesloten accu's
- 2.3.3. De vlakke plaat startaccu (nat)
- 2.3.4. De vlakke plaat semi-tractie accu (nat)
- 2.3.5. De tractieaccu of tractiebatterij (nat)
- 2.3.6. De gesloten (VLRA) gel-accu
- 2.3.7. De gesloten (VLRA) AGM-accu
- 2.3.8. De gesloten (VLRA) "opgerolde cel" accu

2.4 Functie en gebruik van de accu

2.5 De loodzwavelzuur accu in de praktijk

- 2.5.1. Wat kost een accu?
- 2.5.2. Afmetingen en gewicht
- 2.5.3. Het effect van de ontladtijd op de effectieve capaciteit van een accu
- 2.5.4. Capaciteit en temperatuur
- 2.5.5. Voortijdige veroudering 1. Te diepe ontlading van de accu
- 2.5.6. Voortijdige veroudering 2. Te snel laden en niet volledig laden
- 2.5.7. Voortijdige veroudering 3. Te weinig laden
- 2.5.8. Voortijdige veroudering 4. Teveel laden
- 2.5.9. Voortijdige veroudering 5. Temperatuur
- 2.5.10. Zelfontlading

3. **BEWAKING VAN DE LADINGSTOESTAND: DE 'ACCUMONITOR'**

De accumonitor geeft de ladingstoestand van een accu aan en kan ook gebruikt worden om het ladingsproces automatisch op te starten, of aan te geven dat laden nodig is. Bij grotere accubatterijssystemen is een monitor met een ampère-uren teller onontbeerlijk. Beginnen met laden wanneer het voltage al zakt is eenvoudig te laat: de accu is dan te diep ontladen en schade is al toegebracht.

3.1. **De verschillende manieren om de ladingstoestand van een accu te bewaken**

- 3.1.1. De soortelijke massa (SM) van de elektrolytoplossing
- 3.1.2. Accuspanning
- 3.1.3. Ampère-uur (Ah) teller

3.2. **De accumonitor als Ampère-uur teller**

3.3. **Energierendement van een accu**

3.4. **Stroomrendement van een accu**

3.5. **Effect van de ontladstroom op de capaciteit**

3.6. **Leidt een hoge ontladstroom tot capaciteitsverlies?**

3.7. **Andere nuttige eigenschappen van een accumonitor**

- 3.7.1. Tellen van bijzondere gebeurtenissen
- 3.7.2. Gegevensvastlegging

4. **ACCU'S LADEN: DE THEORIE**

Verschillende soorten accu's moeten op verschillende manieren geladen worden. Dit hoofdstuk behandelt de optimale laadkarakteristieken van de meest gebruikte soorten loodzwavelzuur accu's.

4.1. **Inleiding**

4.2. **Laden in drie stappen (I U° U)**

- 4.2.1. Bulkladen
- 4.2.2. Absorptieladen
- 4.2.3. Floatladen of onderhoudsladen

4.3. **Egaliseren**

4.4. **Temperatuurcompensatie**

4.5. **Overzicht**

4.6. **Conclusie: hoe moet een accu worden geladen?**

- 4.6.1. De serviceaccu
- 4.6.2. De startaccu
- 4.6.3. De boegschroefaccu

5. **ACCU'S LADEN MET EEN DYNAMO OF EEN ACCULADER**

De dynamo met standaard regelaar (zoals gebruikt wordt in voertuigen) is verre van de beste oplossing, en zeker niet wanneer meerdere accu's, gescheiden door een diode-isolator, geladen moeten worden.

5.1. **De wisselstroomdynamo**

5.2. **Als de dynamo meer dan één accu moet laden**

- 5.2.1. Inleiding
- 5.2.2. Het probleem
- 5.2.3. Veel verschillende oplossingen
 - 5.2.3.1. Eenvoudig en niet duur: microprocessor gestuurde accuscheiders
 - 5.2.3.2. Dynamospanning verhogen
 - 5.2.3.3. Een meertrapsregelaar met temperatuur- en spanningscompensatie
 - 5.2.3.4. De startaccu
 - 5.2.3.5. De boegschroefaccu

5.3. **Acculaders. Van wisselstroom naar gelijkstroom**

- 5.3.1. Inleiding
- 5.3.2. Optimaal laden met een acculader
- 5.3.3. Meerdere accu's laden
 - 5.3.3.1. Meerdere accu's laden met 1 lader
 - 5.3.3.2. Een aparte acculader per accubank
 - 5.3.3.3. Microprocessor gestuurde accuscheiders

6. ELEKTRISCHE APPARATUUR EN ENERGIEVERBRUIK

Het dagelijks energieverbruik van continue stroomverbruikers (navigatie verlichting, koelkast en vriezer) wordt vaak onderschat, terwijl het verbruik van kortstondige "grootverbruikers" (elektrische lieren, boegschroef, wasmachine, elektrisch fornuis) vaak overschat wordt.

6.1. Inleiding

6.2. Vermogen en energie

6.3. Koeling

6.3.1. Inleiding

6.3.2. Theorie van de warmtepomp

6.3.3. De koelkast en de vriezer in de praktijk

6.3.4. Airconditioning

6.4. Elektrische lieren, ankerlier en boegschroef

6.5. Wassen en afwassen op de accu?

6.6. Ooit gedacht dat elektrisch koken op de accu haalbaar was?

6.7. De duikcompressor

6.8. Hoe om te gaan met de aanloopstroom van wisselstroom-motoren

6.9. Conclusie

7. GENERATOREN

7.1 Dieselmotor met 50 Hz of 60 Hz wisselstroom generator

7.1.1. Veel belasting is beter dan weinig belasting

7.1.2. Een hybride systeem

7.1.3. En vergeet de (beperkte) walstroom niet

7.1.4. 3000 rpm versus 1500 rpm

7.2 Gelijkstroom generatoren

8. KLEINSCHALIGE-ENERGIEOPWEKKING: ANDERS DENKEN

Dit hoofdstuk brengt ons naar het centrale thema van dit boek: het optimaliseren van veiligheid en comfort, en gelijktijdig het verminderen van het gewicht en de afmetingen van het energiesysteem.

8.1. Inleiding

8.2. Nieuwe technologie maakt het DC-concept aantrekkelijker

- 8.2.1. Het DC-concept
- 8.2.2. DC-generatoren
- 8.2.3. Onbeperkt stroom van de omvormer

8.3. Het AC-concept, verbeterd met *PowerControl* en *PowerAssist*

- 8.3.1. Het AC-concept
- 8.3.2. Het AC-concept met generatorvrije periode
- 8.3.3. *PowerControl*

8.4. Nieuw: *Powerassist*, het AC-concept met accu-ondersteuning

- 8.4.1. *PowerAssist*
- 8.4.2. Nog meer voordelen van Combi's of Multi's
- 8.4.3. Walstroom

8.5. Een andere manier van denken

- 8.5.1. Dagelijkse energiebehoefte
- 8.5.2. Accucapaciteit
- 8.5.3. Walstroom

9. ENERGIE BEHOEFTE TOT 4 kWh PER ETMAAL (gemiddeld 170 Watt)

9.1. Inleiding

9.2. Apparatuur en elektriciteitsverbruik

- 9.2.1. Navigatie-instrumenten
- 9.2.2. GPS
- 9.2.3. Marifoon
- 9.2.4. Driekleuren toplicht of ankerlicht
- 9.2.5. Stuurautomaat
- 9.2.6. Radio
- 9.2.7. Kajuitverlichting
- 9.2.8. Koelkast

9.3. Verbruik tijdens een etmaal zeilen

9.4. Voor anker of afgemeerd zonder 230 V aansluiting

9.5. Extra "luxe"

- 9.5.1. Elektronisch navigatiesysteem
- 9.5.2. Kortegolf zender (SSB)
- 9.5.3. Radar
- 9.5.4. Magnetron
- 9.5.5. Verwarming
- 9.5.6. Airconditioning
- 9.5.7. Watermaker

9.6. De accu opladen

- 9.6.1. Met de dynamo op de hoofdmotor
- 9.6.2. Verhogen van de accucapaciteit
- 9.6.3. Een tweede of grotere dynamo
- 9.6.4. Zonne-energie
- 9.6.5. Wind-energie
- 9.6.6. Water generator (schroefas of sleep)
- 9.6.7. Walstroom

9.7. Conclusie

10. ENERGIE BEHOEFTE TOT 14 kWh PER ETMAAL (gemiddeld 600 W)

10.1. Inleiding

10.2. Uitrusting: het minimum

- 10.2.1. Navigatieapparatuur
- 10.2.2. Navigatie verlichting en anker licht
- 10.2.3. Stuurautomaat
- 10.2.4. Koelkast en vriezer
- 10.2.5. Verlichting
- 10.2.6. Radio
- 10.2.7. Overige verbruikers

10.3. Zeilen

10.4. Voor anker of afgemeerd zonder 230 V aansluiting

10.5. Extra's

- 10.5.1. Waterkoker
- 10.5.2. Elektrische kookplaat
- 10.5.3. Kleine wasmachine
- 10.5.4. Kleine vaatwasmachine

10.6. Energieopwekking

- 10.6.1. Dynamo's op de hoofdmotor
- 10.6.2. Alternatieve energiebronnen
- 10.6.3. Dieselgenerator
- 10.6.4. *PowerControl* en *PowerAssist*
- 10.6.5. Nog minder walstroom: het DC-concept
- 10.6.6. De 230 V dieselgenerator op een relatief klein schip: conclusie
- 10.6.7. De diesel-gelijkstroomgenerator of DC-generator
- 10.6.8. Rendement van een dieselgenerator
- 10.6.9. De energievoorziening op een motorjacht van 9 tot 15 meter of een jacht dat voor anker ligt

10.7. Conclusie

- 10.7.1. De conventionele oplossing: een 12 kW generator
- 10.7.2. Een betere oplossing: minder gewicht en ruimte met een generator van 6 kW en *PowerAssist*, of een 5 kW DC generator

11. ENERGIE BEHOEFTE TOT 48 kWh PER ETMAAL (gemiddeld 2 kW)

11.1. Inleiding

11.2. De belangrijkste verbruikers

11.3. Energieopwekking

- 11.3.1. Het generator schip: de generator draait 24 uur per dag
- 11.3.2. Een accu toevoegen voor een generatorvrije periode
- 11.3.3. Parallele Multi's en *PowerControl*, en het DC-concept voor walstroom
- 11.3.4. 1 stap verder: De MultiPlus en *PowerAssist*
- 11.3.5. De DC-generator
- 11.3.6. Toevoeging van kleine DC "hulp" generator teneinde het aantal draaiuren van de grote generator en de benodigde accucapaciteit te verminderen

11.4. Conclusie

- 11.4.1. De 20 kW generator met generatorvrije periode
- 11.4.2. *PowerControl* en het DC-concept voor walstroom, en een hulp set om de accucapaciteit te reduceren
- 11.4.3. Een kleinere generator met *PowerAssist*, het DC-concept voor walstroom en een DC generator

12. ENERGIEBEHOEFTE TOT 240 kWh PER ETMAAL (gemiddeld 10 kW)

12.1. Inleiding

12.2. De belangrijkste verbruikers

12.3. Energieopwekking

- 12.3.1. generatoren
- 12.3.2. Een extra accu voor een generatorvrije periode, en accu-ondersteund generatorgebruik (*PowerAssist*)
- 12.3.3. Toevoeging van een 8 kW AC "hulp" generator teneinde het aantal draaiuren van de grote generator en de benodigde accucapaciteit te verminderen

12.4. Een vergelijking van alternatieven voor een gemiddeld gebruik van 10kW

13. CONCLUSIE

13.1. Het elektriciteitsverbruik aan boord

13.2. Energie opwekken

13.3. Het DC-concept

13.4. *PowerAssist*: het accu-ondersteunde AC-concept

13.5. De service accu

1. INLEIDING

Victron Energy levert al 25 jaar componenten en systemen voor autonome energievoorziening. Dit kunnen systemen zijn voor zeil- en motorjachten, binnenvaartschepen, voor woningen die niet zijn aangesloten op het elektriciteitsnet, voor vele soorten voertuigen en een bijna eindeloze reeks andere, vaak onverwachte, toepassingen.

Wij weten uit ervaring dat het kleinschalig opwekken en opslaan van elektrische energie een complexe aangelegenheid is. De componenten van een autonoom systeem zijn duur en kwetsbaar. De accu bijvoorbeeld - het onmisbare opslagmedium in een kleinschalig systeem - blijkt vaak onverwacht snel uitgeput te raken, waardoor de "stroom uitvalt" en de schade veroorzaakt door overmatige ontlading uiteindelijk betekent dat er voortijdig weer in een nieuwe accu moet worden geïnvesteerd.

Recente ontwikkelingen op het gebied van de autonome energievoorziening aan boord van zeil- en motorjachten maken een en ander niet gemakkelijker. De hoeveelheid (huishoudelijke) apparatuur aan boord van jachten neemt snel toe, terwijl de voor energieopwekking en –opslag beschikbare ruimte en gewicht tot het uiterste minimum wordt beperkt. Leefruimte en vaareigenschappen hebben vanzelfsprekend een hogere prioriteit.

De steeds hogere eisen die aan autonome energie worden gesteld, hebben tot de ontwikkeling van nieuwe producten en concepten geleid. In dit boek worden zulke nieuwe producten en concepten gepresenteerd, waarbij vooral aandacht wordt besteed aan de optimale integratie van de systeemcomponenten en de dagelijkse bediening van het gehele systeem. Bij de bespreking van systeemcomponenten worden de merknamen alleen vermeld wanneer de producten uniek zijn, d.w.z. uitsluitend verkrijgbaar onder de betreffende merknaam, of indien andere merken zeer moeilijk verkrijgbaar zijn. De unieke producten van Victron Energy zijn:

- **Acculaders** met "zelfdenkende" software om het laden automatisch te optimaliseren.

- **Parallelschakelbare omvormers en gecombineerde omvormer/acculaders**

De parallelschakel optie betekent dat er geen beperkingen meer zijn wat betreft de hoeveelheid wisselstroom die vanuit een accu kan worden geleverd. Zoals we zullen laten zien biedt dit de mogelijkheid om vanuit de accu alle gebruikelijke huishoudelijke apparatuur te voeden, waaronder een wasmachine en zelfs een elektrische kookplaat. Hoewel het piekverbruik van deze apparatuur zeer hoog is, is het totale energieverbruik zeer goed beheersbaar en veel lager dan men zou verwachten.

- **PowerControl** is een vaak onderbelichte, maar zeer handige functie van de Victron Phoenix Combi en diens opvolger, de **Phoenix Multi**. De Multi kan enorm veel laadstroom leveren en dus grote accubatterijen laden. Dat betekent een zware belasting (ca. 2 kW of bijna 10 A per Multi) voor de walaansluiting of de generator. Met het Phoenix Multi Control bedieningspaneel kan een maximale wal- of generatorstroom ingesteld worden. De Multi houdt dan rekening met andere stroomverbruikers en gebruikt voor het laden alleen de stroom die nog 'over' is.

- **PowerAssist**. Met de MultiPlus kunt U nog een stap verder gaan. De MultiPlus werkt parallel met de generator of de walaansluiting en verdubbelt het beschikbare vermogen. Tijdelijk te weinig stroom? De MultiPlus haalt extra energie uit de accu en helpt mee! Nog stroom over? De MultiPlus maakt er gebruik van om de accu te laden. U stelt de walstroom in met een simpele 0 tot 16 A draaiknop op het Phoenix Multi Control bedieningspaneel.

Hoewel dit overzicht voornamelijk gericht is op jachten, kunnen veel van de producten en oplossingen ook voor andere autonome energiesystemen worden gebruikt, zoals in woningen waar geen netstroom beschikbaar is, in campers of in speciale bedrijfswagens.

2. DE ACCU: VROEGTIJDIGE VEROUDERING VOORKOMEN

2.1. Inleiding

Ik houd van motoren en in het bijzonder van ouderwetse scheepsmotoren, zonder elektronische franje. Als ze het niet goed doen kun je kijken, luisteren en ruiken en ze zonedig demonteren. Onderdelen kunnen worden vervangen, gerepareerd of gereviseerd. Dan zet je alles in elkaar en het werkt weer! Met een accu is dat niet mogelijk. De accu is een geheimzinnig product. Aan de buitenkant valt niets af te leiden over de kwaliteit, de mogelijke veroudering of de ladingstoestand. Openschroeven om de interne veroudering te beoordelen is ook al niet mogelijk. Openzagen zou kunnen, maar de accu is dan voorgoed onbruikbaar en alleen specialisten kunnen de inhoud analyseren en soms de oorzaak van de storing achterhalen.

Als een accu het niet meer doet, moet hij vervangen worden. Repareren is onmogelijk.

Een accu is duur, groot en erg zwaar. Gaat u maar na: met slechts 10 liter (= 8.4 kg) gasolie en een dieselgenerator kunt u een accu van 24 V 700 Ah (energie-inhoud $24 \times 700 = 16.8$ kWh) laden. Die accu heeft een volume van 300 dm^3 (= 300 liter) en weegt 670 kg!

Bovendien zijn accu's zeer kwetsbaar. Teveel laden, onvoldoende laden, te diep ontladen, te snel laden, te hoge temperatuur.... Het kan allemaal gebeuren en de gevolgen zijn desastreus.

Het doel van dit hoofdstuk is uit te leggen waarom accu's soms te snel verouderen en wat u kunt doen om ze een langere levensduur te geven. En als u in een kapotte accu wilt kijken, open hem dan niet zelf. Het is een zeer vies karwei en voor de prijs van een nieuwe broek (één spatje zwavelzuur op uw broek en u kunt hem weggoien!) kunt u net zo goed het boek van Nigel Calder kopen, "Boatowner's Mechanical and Electrical Manual", en de vele close-ups van kapotte accu's in hoofdstuk 1 bekijken.

2.2. De chemie van de accu

2.2.1. Wat gebeurt er in een cel tijdens het ontladen?

Wanneer een cel wordt ontladen ontstaat door opname van zuur uit de elektrolytoplossing loodsulfaat in zowel de positieve als de negatieve platen. De hoeveelheid elektrolyt in de cellen blijft nagenoeg gelijk. Het zuurgehalte in de elektrolytoplossing neemt echter af, wat merkbaar is aan de verandering in het soortelijk gewicht.

2.2.2. Wat gebeurt er tijdens het laden?

Tijdens het laden vindt het omgekeerde proces plaats. Op beide platen komt zuur vrij, waarbij de actieve massa in positieve plaat wordt omgezet in loodoxide en in de negatieve plaat in poreus sponsachtig lood. Als het laadproces ten einde loopt en het loodsulfaat grotendeels is omgezet zal een toenemend gedeelte van de toegevoerde energie gebruikt worden om water te ontleiden in waterstofgas en zuurstofgas. Dit is een uiterst explosief mengsel, wat verklaart waarom de aanwezigheid van open vuur of vonken in de nabijheid van een accu tijdens het laden zeer gevaarlijk kan zijn. Daarom moet een accu ruimte doeltreffend geventileerd worden.

2.2.3. Het diffusieproces

Wanneer een accu wordt ontladen verplaatsen ionen zich door de elektrolytoplossing en door het actieve materiaal van de platen om contact te kunnen maken met het lood en loodoxide dat nog niet chemisch in loodsulfaat is omgezet. Deze beweging van ionen door de elektrolytoplossing wordt diffusie genoemd. Wanneer de accu wordt geladen vindt een soortgelijk diffusieproces plaats. Het diffusieproces verloopt betrekkelijk langzaam en, zoals u zich kunt indenken, vindt de chemische reactie het eerst plaats op het oppervlak van de platen en pas later (en ook langzamer) diep binnenin het actieve materiaal van de platen.

2.2.4. De levensduur

Afhankelijk van de bouw en het gebruik varieert de levensduur van een accu van enkele jaren tot 10 jaar of langer. De belangrijkste redenen waarom accu's verouderen zijn:

- **Massaverlies.** Intensief cyclisch gebruik (= ontladen en opnieuw laden van de accu) is de belangrijkste reden waarom dit gebeurt. Het effect van de herhaalde chemische transformatie van de actieve massa in de platen heeft de neiging de cohesie te verminderen en het actieve materiaal valt dan uit de platen en zinkt naar de bodem van de accu.
- **Corrosie** van het rooster van de positieve plaat. Dit gebeurt wanneer een accu wordt geladen, vooral aan het einde van de laadcyclus als de accuspanning hoog is. Het is ook een langzaam maar voortdurend proces bij het onderhoudsladen van een accu. Corrosie doet de interne weerstand toenemen en zal uiteindelijk resulteren in het uiteen vallen van de positieve platen.
- **Sulfatering.** In tegenstelling tot de twee hierboven genoemde verouderingsprocessen is sulfatering te voorkomen. Wanneer een accu ontladend wordt de actieve massa in zowel de positieve als de negatieve platen in zeer kleine sulfaatkristallen omgezet. Indien een accu niet snel weer geladen wordt hebben deze kristallen de neiging om te groeien en te verharderen en vormen dan een

ondoordringbare laag die niet opnieuw in actief materiaal kan worden omgezet. Het resultaat is capaciteitsverlies, totdat de accu onbruikbaar is geworden.

2.3. De meest voorkomende soorten loodzwavelzuur accu's

2.3.1. Loodantimoon en loodcalcium

Lood wordt met antimoon gelegeerd (met een geringe toevoeging van enkele andere elementen, zoals selenium of tin) of met calcium opdat het materiaal duurzamer en gemakkelijker te verwerken wordt. Voor de gebruiker is het belangrijk te weten dat, in vergelijking met loodcalcium accu's, met antimoon gelegeerde accu's een hogere zelfontlading hebben en een hogere laadspanning nodig hebben, maar ook een groter aantal laad/ontlaad cycli kunnen doorstaan.

2.3.2. Open en gesloten accu's

Open accu's zijn gevuld met vloeibaar elektrolyt. In een gesloten accu is de elektrolyt meestal gevormd tot een gel (de gel-accu) of geabsorbeerd in microporeus materiaal (de AGM-accu).

Een open (of "natte") accu zal tegen het einde van de het laadproces gaan "gassen", zie paragraaf 2.2.2.

Bij gesloten accu's beweegt het zuurstofgas dat op de positieve platen wordt gevormd naar de negatieve platen waar het, na een gecompliceerde chemische reactie, met waterstof recombineert tot water. Er ontsnapt praktisch geen gas uit de accu. Waterstofgas wordt alleen gevormd als de laadspanning en laadstroom te hoog zijn. Het gas ontsnapt dan via een veiligheidsventiel, wat de naam VRLA-accu verklaart: Valve Regulated Lead Acid accu. Gesloten accu's worden ook wel "gasdicht" genoemd: deze benaming is onjuist! Indien er als gevolg van verkeerd laden regelmatig gas ontsnapt uit een gesloten accu zal de elektrolyt uitdrogen en wordt de accu onbruikbaar.

Accu's kunnen ook van elkaar worden onderscheiden op basis van hun mechanische constructie en gebruik, zoals in de volgende paragrafen wordt beschreven.

2.3.3. De vlakke plaat startaccu (nat)

Dit is de accu die in auto's wordt gebruikt. Deze accu is uitsluitend ontworpen voor kortstondige hoge ontladestroom (het starten van de motor) en heeft daarom dunne platen met een groot oppervlak. Bij herhaalt diep ontladen kunnen de platen krom trekken en zal al snel massaverlies optreden. Toch worden "heavy duty" vlakke plaat startaccu's vaak als serviceaccu op kleinere jachten gebruikt.

2.3.4. De vlakke plaat semi-tractie accu (nat)

Deze accu heeft dikkere platen en betere separatoren tussen de platen om kromtrekken en massaverlies bij cyclisch gebruik te voorkomen.

2.3.5. De tractieaccu of tractiebatterij (nat)

Bij deze accu, die zeer goed bestand is tegen cyclisch gebruik, worden meestal positieve buisjesplaten toegepast in combinatie met negatieve roosterplaten. Tractie batterijen worden bijvoorbeeld in vorkheftrucks gebruikt, waarbij de accu elke dag 60-80% wordt ontladen en vervolgens 's nachts weer wordt geladen.

Een tractiebatterij dient bij intensief cyclisch gebruik periodiek een egalisatielading te ondergaan. De egalisatie lading bestaat uit het nog enkele uren doorladen van de accu met relatief weinig stroom, nadat het normale laadproces voltooid is. De laadspanning loopt dan op. Hoe hoog de spanning wordt hangt af van de chemische samenstelling en de ouderdom van de accu.

De hoge laadspanning is onder meer nodig om eventueel resterend sulfaat om te zetten in actief materiaal en om **stratificatie** van de elektrolytoplossing te voorkomen. Het zwavelzuur (H_2SO_4) dat tijdens het laden van de accu ontstaat, heeft een hogere dichtheid dan water en zakt daardoor naar beneden, waardoor de zuurconcentratie onder in de accu hoger wordt dan bovenin de accu. De gasontwikkeling tijdens de egalisatielading zorgt ervoor dat de elektrolytoplossing weer goed wordt gemengd.

De cellen van buisjesplaat accu's zijn hoog en smal. Bij vlakkeplaat accu's zijn de cellen juist laag en breed. Daarom is bij een buisjesplaat accu veel meer gasontwikkeling nodig om de elektrolytoplossing goed te mengen dan bij een vlakkeplaat accu.

2.3.6. De gesloten (VRLA) gel-accu

Hierbij is de elektrolyt als gel geïmmobiliseerd. Deze accu is zeer bekend onder de naam Sonnenschein Dryfit A200, Sportline of Exide Prevailer.

2.3.7. De gesloten (VRLA) AGM-accu

AGM staat voor Absorbed Glass Mat. In deze accu's is de elektrolyt geabsorbeerd in een glasvezel mat die geklemd is tussen de platen. In een AGM-accu verplaatsen de ladingdragers, waterstofionen (H_2) en sulfationen (SO_4), zich gemakkelijker tussen de platen dan in een gel-accu. Hierdoor is een AGM-accu geschikter voor het kortstondig leveren van zeer hoge stroom dan een gel-accu.

2.3.8. De gesloten (VRLA) "opgerolde cel" accu

Deze accu is bekend onder de naam Optima (Exide heeft een soortgelijk product) en is een variant op de VRLA AGM-accu. Elke cel bestaat uit een opgerold samenstelsel van 1 negatieve en 1 positieve

plaat met daartussen weer een mat waarin de elektrolyt geabsorbeerd is. Het resultaat is een grote mechanische stevigheid en een zeer lage inwendige weerstand. De opgerolde cel accu kan kortstondig een zeer hoge stroom leveren, doorstaat hoge laadstromen zonder te warm te worden en is, voor een VRLA-accu, bestand tegen zeer hoge laadspanning (tot 15 Volt voor een 12 Volt accu) zonder dat gas ontsnapt.

2.4. Functie en gebruik van de accu

In een autonoom energiesysteem werkt de accu als een buffer tussen de stroombronnen (acculader, zonnecellen, windmolen, dynamo) en de verbruikers. In de praktijk betekent dit cyclisch gebruik, maar dan wel een heel speciale, "onregelmatige" variant. Dit in tegenstelling tot het voorbeeld van de vorkheftruck, waarbij de gebruikscyclus zeer voorspelbaar is.

Op een jacht kunnen zich bijvoorbeeld de volgende situaties voordoen:

- Het jacht vaart of ligt voor anker in een fraaie baai. De opvarenden willen geen lawaai, dus alle elektriciteit wordt door de accu geleverd. Eén of twee keer per dag wordt de hoofdmotor of de dieselgenerator een paar uur aangezet om de service accu voldoende op te laden voor de volgende generatorvrije periode. Dit is cyclisch gebruik, waarbij bovendien de laadtijd te kort is om de accu volledig te laden.
- Het jacht vaart vele uren achtereen door op de motor. De dynamo's op de hoofdmotor krijgen dan de tijd om de accu goed op te laden.
- Het jacht ligt aan wal. De acculaders zijn aangesloten op walstroom en de accu staat 24 uur per dag onder lading. Als gebruik wordt gemaakt van het DC-concept (zie paragraaf 8.2) kunnen elke dag verscheidene ondiepe ontladingen optreden.
- Het jacht wordt tijdens de winter niet gebruikt. De accu's ontladen zich langzaam tgv zelfontlading (zie paragraaf 2.4.10), staan onder onderhoudslading van een acculader, of worden door middel van een zonnepaneel of windmolen geladen gehouden.

Het aantal cycli per jaar, de omgevingstemperatuur en vele andere factoren die van invloed zijn op de levensduur van een accu variëren per gebruiker.

Hierna worden al deze factoren kort besproken.

2.5. De loodzwavelzuur accu in de praktijk

2.5.1. Wat kost een accu?

Wij geven hier een grove schatting van de prijs. Naast alle kwaliteits- en gebruiksoverwegingen zijn ten slotte ook de kosten belangrijk.

Type accu	Toepassing	Veel toegepaste systeemspanning, capaciteit en energie-inhoud			Prijsindicatie ex. BTW	Prijsindicatie per kWh
		V	Ah	kWh	USD of EURO	USD of EURO per kWh
Start	Starten	12	100	1.2	100	80
Opgerolde cel	Starten, boegschroef	12	60	0.72	250	350
Semi-tractie	Serviceaccu tot ongeveer 600 Ah	12	200	2.4	300	125
VRLA AGM-accu	Serviceaccu tot ongeveer 600 Ah. Tevens start en boegschroef	12	230	2.8	600	210
Tractie (buisjesplaat)	Serviceaccu tot ongeveer 2000 Ah	24	1000	24	4.500	190
VRLA-gel Sonnenschein Dryfit A200	Serviceaccu tot ongeveer 600 Ah	12	200	2.4	500	210
VRLA-gel Sonnenschein Dryfit A600	Serviceaccu tot ongeveer 1500 Ah	24	1500	36	11.000	305

Uit de tabel blijkt dat de kosten, afhankelijk van de accukeuze, zeer sterk variëren en dat open accu's minder duur zijn dan gesloten accu's.

Gesloten accu's bieden echter veel gebruiksgemak, omdat zij:

- onderhoudsvrij zijn.
- niet of nauwelijks gassen (mits de accu niet met een te hoge spanning wordt geladen).
- daarom op moeilijk bereikbare plaatsen kunnen worden geïnstalleerd.

Aan de andere kant zijn gesloten accu's minder goed bestand tegen overladen (behalve de opgerolde cel accu). Overladen leidt tot gassen (via het veiligheidsventiel) wat resulteert in waterverlies dat niet meer kan worden aangevuld. Het gevolg is capaciteitsverlies en voortijdige veroudering.

2.5.2. Afmetingen en gewicht

Type accu	V	Ah	kWh	Volume dm ³	Gewicht kg	Specifiek volume Wh / dm ³	Specifiek gewicht Wh / kg
Start	12	100	1.2	16	28	75	43
Opgerolde cel	12	60	0.72	8.5	17.2	81	42
Semi-tractie	12	200	2.4	33	60	73	40
VRLA AGM-accu	12	230	2.8	33	62	85	45
Tractie (buisjesplaat)	24	1000	24	280	770	85	32
VRLA-gel Sonnenschein Dryfit A200	12	200	2.4	33	70	72	34
VRLA-gel Sonnenschein Dryfit A600	24	1500	36	600	1440	60	25

Uit deze tabel blijkt hoe zwaar en onhandig accu's zijn.

Om terug te komen op de vergelijking die in paragraaf 2.1 werd gemaakt:

In vergelijking met de energie die vrijkomt bij de verbranding van bijvoorbeeld dieselolie, zijn accu's eenvoudig geen partij. Bij verbranding levert 10 liter dieselolie (gewicht 8.4 kg) ongeveer 100 kWh thermische energie op. Dus een dieselgenerator kan met 10 liter dieselolie en een gemiddeld rendement van 20% 20 kWh elektrische energie opwekken. Dit is de energie die nodig is om een accu van 24 V en 700 Ah te laden. Een dergelijke accu heeft een volume van 300 dm³ (= 300 liter) en weegt 670 kg!

Een andere sprekende vergelijking is het verwarmen van water. Voor het aan de kook brengen van 1 liter (= 1 kg) water in een elektrische ketel is 0,1 kWh nodig. Om de benodigde 0,1 kWh te leveren is een accu van ongeveer 4 kg nodig!

2.5.3. Het effect van de onlaadtijd op de effectieve capaciteit van een accu

De beschikbare capaciteit van een accu is afhankelijk van de onlaadsnelheid. Hoe sneller een accu ontladen wordt (maw: hoe hoger de onlaadstroom), hoe minder capaciteit (ampère – uur of Ah) beschikbaar zal zijn. Dit staat in verband met het diffusieproces (par. 2.2.3).

Meestal wordt de capaciteit aangegeven voor een onlaadtijd van 20 uur (ontlaadstroom $I = C / 20$).

Voor een accu van 200 Ah betekent dit dat de nominale capaciteit kan worden geleverd bij een onlaadstroom van 200 Ah / 20 uur = 10 Ampère.

Met een onlaadstroom van 200 A raakt dezelfde accu veel sneller "leeg". Een 200 Ah gel-accu bijvoorbeeld heeft dan een beschikbare capaciteit van slechts 100 Ah en is daarom na 30 minuten al leeg. (zie ook hoofdstuk 3: de accumonitor).

De volgende tabellen geven een indruk van de capaciteit als functie van de onlaadstroom.

In de 2^e kolom van de eerste tabel wordt de door de fabrikant aangegeven nominale capaciteit weergegeven, samen met de bijbehorende onlaadtijd. Vaak is dit 20 uur, maar het kan ook 10 uur of 5 uur zijn.

Uit de tabellen blijkt hoe sterk de capaciteit afneemt bij toenemende onlaadstroom en dat AGM-accu's (vooral de opgerolde cel accu) bij een hoge onlaadstroom beter presteren dan gel-accu's.

Type	Ontlaadstroom	Nominale capaciteit en bijbehorende ontladtijd	Ontlادتijd	Ontlaadstroom	Effectieve capaciteit bij 1.83 V / cel (11 V)		Ontlادتijd
					Ah	%	
	Ampère (nominaal)		uren	A (C / 5)			uren
Start	5	100 Ah / 20 h	20				
Opgerolde cel	2.8	56 Ah / 20 h	20	11.2	52	93	4.6
Semi-tractie	10	200 Ah / 20 h	20	40	150	75	3.75
VRLA AGM-accu	11.5	230 Ah / 20 h	20	46	198	86	4.3
Tractie (buisjesplaat)	200	1000 Ah / 5 h	5	200	1000	100	5
VRLA-gel Sonnenschein Dryfit A200	10	200 Ah / 20 h	20	40	158	79	4
VRLA-gel Sonnenschein Dryfit A600	150	1500 Ah / 10 h	10	300	900	60	3

Type	Ontlaadstroom	Effectieve capaciteit bij 1.83 V / cel (11 V)		Ontlادتijd	Ontlaadstroom	Effectieve capaciteit bij 1.75 V / cel (10.5 V)		Ontlادتijd
		Ah	%			Minuten	A (C / 1)	
	A (C / 2)			Minuten	A (C / 1)			Minuten
Start								
Opgerolde cel	28	43	77	92	56	42	75	45
Semi-tractie	100	110	55	66	200	90	45	27
VRLA AGM-accu	115	157	68	82	230	142	62	37
Tractie (buisjesplaat)	500	700	70	80	1000	400	40	24
VRLA-gel Sonnenschein Dryfit A200	100	120	60	72	200	100	50	30
VRLA-gel Sonnenschein Dryfit A600	750	375	25	15	1500	0*	0	0*

* Bij een ontlادتroom van 1500 A (C / 1) zakt de spanning van een A600 accu bijna onmiddellijk naar 1.65 V / cel (d.w.z. 9.9 V resp. 19.8 V voor een systeem van 12 V respectievelijk 24 V).

Ontlادتroom wordt vaak uitgedrukt in verhouding tot de nominale capaciteit. Voor een accu van 200 Ah betekent C / 5 bijvoorbeeld een ontlادتroom van 40 A (= 200 Ah / 5).

2.5.4. Capaciteit en temperatuur

De effectieve capaciteit van een accu varieert omgekeerd evenredig aan de temperatuur:

10°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
80 %	92 %	95 %	100 %	103 %	105 %

2.5.5. Voortijdige veroudering 1. Te diepe ontlading van de accu.

Naarmate accu's dieper worden ontladen verouderen ze sneller (vanwege versnelde uitval van de actieve massa, zie par. 2.2.4.) en wanneer een bepaalde grens wordt overschreden (ongeveer 80 % ontlading), neemt het verouderingsproces onevenredig snel toe. Als de accu in ontladen toestand wordt achtergelaten zullen bovendien de platen sulfateren (zie par. 2.2.4.).

Zoals ook al in paragraaf 2.2.4 werd uitgelegd, verouderd een accu zelfs als deze geladen wordt gehouden en niet wordt gebruikt, voornamelijk tgv corrosie van het rooster van de positieve platen. De volgende tabel geeft globaal het aantal laad/ontlaadcycli weer dat accu's tot het einde van hun levensduur kunnen doorstaan en hoe gevoelig ze zijn voor sulfatering en corrosie.

Type	Aantal cycli tot het einde van de levensduur		Sulfatering bij 100 % ontlading	Verwachte levensduur indien de accu bijna continu onder lading staat en nauwelijks cyclisch belast wordt. (omgevingstemperatuur 20 °C)
	Ontlaaddiepte 80 %	Ontlaaddiepte 60 %		
Start	Niet geschikt voor cyclisch gebruik			5
Opgesloten cel	400	650	Binnen een paar dagen onherstelbaar gesulfateerd	10
Semi-tractie	200	350	Binnen een paar dagen onherstelbaar gesulfateerd	5
VRLA AGM-accu	250	450	Overleeft maximaal 1 maand in kortgesloten toestand	4 - 10
Tractie (buisjesplaat)	1500	2500	Overleeft maximaal 1 maand in ontladen toestand	10 – 15
VRLA-gel Sonnenschein Dryfit A200	250	450	Overleeft maximaal 1 maand in ontladen toestand	4 – 5
VRLA-gel Sonnenschein Dryfit A600	600	900	Overleeft maximaal 1 maand in ontladen toestand	15 – 18

Het aantal laad/ontlaadcycli is sterk afhankelijk van de ontladdiepte (eng. Depth of Discharge, DoD) Accu's worden geacht het einde van hun levensduur te hebben bereikt wanneer de capaciteit tot 80 % van de nominale capaciteit is gereduceerd.

Hoewel de meeste accu's zich na een volledige ontlading weer kunnen herstellen is het desondanks zeer slecht voor de levensduur. Accu's moeten **nooit** volledig ontladen worden en al helemaal niet in ontladen toestand worden achtergelaten. Hierbij moet ook opgemerkt worden dat de accuspanning van een accu die in gebruik is geen goede maatstaf is voor het ontladingsniveau. De accuspanning wordt teveel door andere factoren beïnvloed, zoals de ontladstroom en de temperatuur. Pas wanneer de accu bijna geheel ontladen is (DoD 80% tot 90%) zal de spanning snel dalen. De accu moet worden opgeladen **voordat** dit gebeurt. Daarom wordt voor een doeltreffend beheer van grote en dure accu's het gebruik van een accumonitor (hoofdstuk 3) sterk aanbevolen.

2.5.6. Voortijdige veroudering 2. Te snel laden en niet volledig laden.

Accu's kunnen snel worden geladen en accepteren een hoge laadstroom tot de gasspanning is bereikt. Hoewel met veel stroom laden een paar keer goed kan gaan, zal dit zeker de levensduur van de meeste accu's aanzienlijk verkorten. De oorzaak is versnelde achteruitgang van de cohesie van het actieve materiaal. Meestal wordt aanbevolen de laadstroom tot $C / 5$ te beperken, met andere woorden, tot een vijfde deel of 20 % van de nominale capaciteit.

Indien een accu wordt geladen met een spanning die hoger ligt dan $C / 5$, kan bovendien de temperatuur sterk stijgen. Temperatuurcompensatie van de laadspanning is dan een absolute noodzaak (zie par. 2.5.9). Naar mijn eigen ervaring resulteert het laden van een voor 50 % ontladen 12 V 100 Ah natte accu met een stroom van 33 A ($C / 3$) in een temperatuurstijging van 10 tot 15 °C. De maximum temperatuur wordt aan het einde van de bulkfase bereikt. Grotere accu's worden zelfs nog heter (omdat de hoeveelheid opgewekte warmte toeneemt met het volume en de afgifte van warmte toeneemt met het beschikbare oppervlak).

Een voorbeeld:

Stel dat een zeiljacht van 50 voet een serviceaccu heeft van 24 V met een capaciteit van 800 Ah. De maximale laadstroom zou dan $C / 5 = 160$ A zijn. In 2 uur tijd kan dan 320 Ah worden geladen. Als er tegelijkertijd een verbruik van 15 A is, zal de laadapparatuur 175 A moeten leveren. Over de resterende 22 uur van een etmaal kan dan gemiddeld $320 \text{ Ah} / 22 \text{ uur} = 14,5$ A gebruikt worden, hetgeen een ontlading van slechts $320 / 800 = 40$ % betekent. Dit lijkt weinig, maar is helaas het maximaal haalbare als de periode waarin de generator wordt gebruikt tot 2 uur wordt beperkt. De accu wordt namelijk, wanneer hij op deze wijze wordt gebruikt, geladen tot ca 80 % (daarboven stijgt de laadspanning en neemt de laadstroom af) en weer ontladen tot ca. 40 %. Dieper ontladen en sneller laden zou tot een aanzienlijke verkorting van de levensduur leiden. In het hierboven beschreven voorbeeld wordt de accu in **gedeeltelijk geladen toestand** (tussen 20 % en 60 % DoD) gebruikt.

Er zijn twee belangrijke redenen waarom het aantal cycli in gedeeltelijk geladen toestand moet worden beperkt:

1) Stratificatie van de elektrolytoplossing.

Dit probleem komt specifiek voor bij accu's met vloeibaar elektrolyt: open of natte accu's, zie par. 2.3.6. Als vuistregel moet men het gebruik in gedeeltelijk geladen toestand niet langer voortzetten dan ongeveer 30 cycli en zelfs veel minder in geval van zeer diepe ontladingen.

2) Onbalans van de cellen.

De cellen van een accu zijn nooit identiek. Sommige cellen hebben wat minder capaciteit. Sommige cellen laten zich ook wat minder gemakkelijk laden (zie par. 3.4.). Bij cyclisch gebruik in gedeeltelijk geladen toestand zullen deze "zwakkere" cellen steeds verder achterlopen bij de betere cellen. Om de accu weer volledig te laden moet voldoende lading toegevoerd worden om de zwakste cel te laden, wat betekent dat de betere cellen teveel moeten worden geladen, zie par. 4.3.

Onbalans neemt sneller toe bij zeer diepe ontladingen en bij zeer hoge laadstroom. Om overmatige onbalans van de cellen te voorkomen moet een accu tenminste elke 30 tot 60 cycli volledig worden geladen. Bij zwaar cyclisch gebruik (de vorkheftruck bijvoorbeeld) zal een normale lading niet voldoende zijn om de accu volledig te laden: de normale lading moet dan af en toe gevolgd worden door een egalisatie lading, zie par. 4.3.

2.5.7. Voortijdige veroudering 3. Te weinig laden.

Zoals beschreven in par. 2.2.4, treedt sulfatering op als een accu in volledig ontladen toestand wordt achtergelaten. Sulfatering zal ook, maar langzamer, plaatsvinden als een accu in gedeeltelijk ontladen toestand wordt achtergelaten. Daarom wordt aanbevolen om een accu nooit in meer dan 50 % ontladen toestand achter te laten en om de accu regelmatig volledig te laden, bijvoorbeeld om de 30 dagen. Accu's, vooral moderne natte accu's met een laag antimoongehalte, worden vaak te weinig geladen omdat de laadspanning van de acculader te laag is afgesteld (zie hoofdstuk 4).

Samen met te diep ontladen, is het niet volledig laden de belangrijkste oorzaak van de voortijdige veroudering van een accu.

2.5.8. Voortijdige veroudering 4. Teveel laden.

Teveel laden leidt tot overmatige gasontwikkeling en daardoor waterverlies. Bij open accu's kan het waterverlies, veroorzaakt door overmatige gasontwikkeling weer worden aangevuld (maar de versnelde corrosie van de positieve platen die tegelijkertijd plaatsvindt is onherstelbaar). Gesloten accu's waaruit gas ontsnapt, kunnen echter niet worden bijgevuld en zijn daarom veel gevoeliger voor overladen. Een veel voorkomende oorzaak van overmatig laden is het ontbreken van temperatuurcompensatie (zie par.4.4.) of het gelijktijdig laden van accu's met behulp van diode laadstroomverdelers (zie hoofdstuk 5).

2.5.9. Voortijdige veroudering 5. Temperatuur.

De temperatuur van een accu kan om verscheidene redenen sterk variëren:

- Snel ontladen en snel laden verhit de accu (zie par. 2.5.6 en 2.5.8).

- De locatie van de accu. In de machinekamer van een schip kan een temperatuur van 50 °C of meer voorkomen. In een voertuig kan de temperatuur variëren van - 20 °C tot + 50 °C.

Een hoge gemiddelde werktemperatuur leidt tot versnelde veroudering, omdat de chemische afbraakprocessen in de accu zich bij een hogere temperatuur sneller voltrekken. Meestal wordt de levensduur van een accu door de fabrikant wordt opgegeven bij een omgevingstemperatuur van 20 °C. De levensduur van een accu **halveert** bij elke temperatuurstijging van 10 °C.

De volgende tabel geeft een indruk van de levensduur bij verschillende temperaturen.

Type accu	Verwachte levensduur indien de accu bijna continu onder lading staat en nauwelijks cyclisch belast wordt (jaren)		
	20°C	25°C	30°C
Start	5	3.6	2.5
Opgerolde cel	10	7	5
Semi-tractie	5	3.6	2.5
VRLA AGM-accu	8	6	4
Tractie (buisjesplaat)	10	7	5
VRLA-gel Sonnenschein Dryfit A200	5	3.6	2.5
VRLA-gel Sonnenschein Dryfit A600	16	11	8

Tenslotte speelt temperatuur een grote rol bij het laden van de accu. De gasspanning en daarmee de optimale absorptie- en onderhouds-laadspanning nemen namelijk af naarmate de temperatuur van de accu stijgt. Dit betekent dat bij een vaste laadspanning een koude accu onvoldoende wordt geladen en een warme accu teveel wordt geladen.

Zie par. 4.4 voor meer informatie over de temperatuur en het laden van accu's.

2.5.10. Zelfontlading

Een accu die niet wordt gebruikt verliest capaciteit ten gevolge van zelfontlading. De snelheid waarmee de zelfontlading plaatsvindt is afhankelijk van het type accu en de temperatuur.

Type	Legering	Zelfontlading per maand bij 20°C	Zelfontlading per maand bij 10°C
Start	Antimoon (1,6 %)	6 %	3 %
Opgerolde cel	Puur lood	4 %	2 %
Semi-tractie	Antimoon (1,6 %)	6 %	3 %
VRLA AGM-accu	Antimoon (1,6 %)	3 %	1.5 %
Tractie (buisjesplaat)	Antimoon (5 %)	12 %	6 %
VRLA-gel Sonnenschein Dryfit A200	Calcium	2 %	1 %
VRLA-gel Sonnenschein Dryfit A600	Calcium	2 %	1 %

Open loodantimoon accu's moeten, wanneer zij niet worden gebruikt, uiterlijk na 4 maanden worden geladen, tenzij de gemiddelde omgevingstemperatuur laag is.

Gesloten accu's kunnen een rustperiode van 12 maanden zonder bijladen doorstaan.

Wanneer een accu gedurende een lange periode niet wordt gebruikt, is het belangrijk deze los te koppelen van het elektrische systeem, zodat er geen versnelde ontlading kan optreden ten gevolge van lekstromen elders in het systeem.

3. BEWAKING VAN DE LADINGSTOESTAND VAN EEN ACCU 'DE ACCUMONITOR'

3.1. Verschillende manieren om de ladingstoestand van een accu te bewaken

3.1.1. De soortelijke massa (SM) van de elektrolytoplossing

Zoals in paragraaf 2.2.1 al werd uitgelegd bestaat de elektrolytoplossing van een loodzwavelzuur accu uit een mengsel van water en zwavelzuur. Bij een volledig geladen accu bestaat de actieve massa van de negatieve platen uit zuiver, sponsachtig lood; en van de positieve platen uit loodoxide. De concentratie van zwavelzuur in de elektrolytoplossing (en daardoor de SM) is dan hoog.

Tijdens het ontladen reageert het zwavelzuur met het actieve materiaal in de positieve en negatieve platen, waardoor loodsulfaat en water wordt gevormd. Hierdoor daalt het zwavelzuurgehalte en daarmee de SM van de elektrolytoplossing.

Tijdens het ontladen kan de laadtoestand van de accu vrij goed gevolgd worden door de SM van de elektrolytoplossing te bepalen met behulp van een zuurweger, zoals in de volgende tabel wordt weergegeven:

Diepte van de ontlading (%)	Soortelijke massa	Accuspanning
0	Tussen 1.265 en 1.285	12.65 +
25	1.225	12.45
50	1.190	12.24
75	1.155	12.06
100	1.120	11.89

Tijdens het laden vindt het omgekeerde proces plaats en wordt weer zwavelzuur gevormd. Omdat zwavelzuur zwaarder is dan water zal dit in accu's met vloeibaar elektrolyt (dit geldt dus niet voor gel- en AGM-accu's) naar beneden zakken, waardoor de zuurconcentratie onder in de accu stijgt. De zuurconcentratie in de vloeistof boven de platen verandert echter niet!

Nuttige informatie over elektrolyt:

- Stratificatie

Pas wanneer tijdens het laden de **gasspanning** (2.39 V per cel, of 14.34 V voor een accu van 12 V bij 20°C) is bereikt zal de elektrolytoplossing langzaam weer goed gemengd worden door de opstijgende gasbellen.

De tijd die hiervoor nodig is hangt af van de bouw van de accu en de gasontwikkeling. De gasontwikkeling is afhankelijk van de laadspanning, het antimoon gehalte en de leeftijd van de accu. Accu's met een relatief hoog antimoongehalte (2,5 % of meer) hebben meestal voldoende gasontwikkeling tijdens de absorptielading om de elektrolytoplossing weer homogeen te maken. Moderne accu's met een laag antimoongehalte (1,6 % of minder) vertonen echter zo weinig gasontwikkeling dat een normale laadcyclus niet voldoende is. Het duurt dan weken onderhoudsladen (met zeer weinig gasontwikkeling) voordat de elektrolyt weer goed is gemengd. **Hierdoor kan bij een open accu nadat deze volledig is geladen, toch een lage soortelijke massa gemeten worden!**

N.B.: Trillingen en beweging van een schip of voertuig zullen bijdragen aan het goed mengen van de elektrolyt.

- Temperatuurcorrectie voor soortelijke massa metingen met de zuurweger:

De SM varieert omgekeerd evenredig met de temperatuur. Bij elke temperatuurstijging van 14°C boven de 20°C, neemt de gemeten soortelijke massa met 0.01 af. Dus een meting van 1,27 bij 34°C is gelijkwaardig aan een meting van 1,28 bij 20°C.

- Soortelijke massa variaties per regio:

De SM-waarden die in de bovenstaande tabel worden vermeld zijn kenmerkend voor een gematigd klimaat. In een warm klimaat wordt in het algemeen elektrolyt met een lagere concentratie zwavelzuur gebruikt om het negatieve effect van de hogere omgevingstemperatuur op de levensduur van een accu te verminderen:

SM van een volledig geladen accu, gematigd klimaat:	1.265	-1.285
SM van een volledig geladen accu, subtropisch klimaat:	1.250	-1.265
SM van een volledig geladen accu, tropisch klimaat:	1.235	-1.250

3.1.2. Accuspanning

Ook de accuspanning kan als globale indicatie van de laadtoestand van de accu worden gebruikt (zie de tabel in paragraaf 3.1.1). Een bruikbare spanningsmeting is pas mogelijk nadat de accu enige uren met rust gelaten is (niet laden of ontladen).

3.1.3. Ampère-uur (Ah) teller

Dit is de meest praktische en nauwkeurige manier om de laadtoestand van een accu bij te houden. Het product dat speciaal voor dit doel is ontworpen is de batterij- of accumonitor. In de volgende paragrafen wordt het gebruik van de accumonitor uitgebreid besproken.

3.2. De accumonitor als ampère-uur teller

De belangrijkste functie van de accumonitor is het volgen en weergeven van de laadtoestand van een accu, vooral om onverwachte totale ontlading te voorkomen.

Een accumonitor houdt de laad- en ontladstromen van de accu bij. Integreren van deze stroom levert het aantal ampère-uren (Ah) op waarmee de accu geladen of ontladen is.

Bij een constante stroom komt integreren neer op het vermenigvuldigen van stroom en tijd. Bijvoorbeeld: een ontladstroom van 10 A gedurende 2 uur betekent dat de accu met $10 \times 2 = 20$ Ah is ontladen.

3.3. Energierendement van een accu

Bij het laden en ontladen van een accu ontstaat verlies. De totale hoeveelheid elektrische energie die de accu tijdens het ontladen afgeeft is ongeveer 25 % lager dan de energie die tijdens het laden wordt opgenomen, wat een rendement betekent van 75 %. Een hoge laad- en ontladstroom verlaagt het rendement. Het grootste verlies ontstaat doordat de spanning tijdens het ontladen lager is dan tijdens het laden. Verder ontstaat verlies doordat tegen het einde van de laadcyclus door een gedeelte van de laadstroom water in zuurstof en waterstof wordt omgezet. Accu's die weinig gassen (accu's met een laag antimoongehalte) en een lage inwendige weerstand hebben zijn het meest efficiënt.

Wanneer een accu in gedeeltelijk geladen toestand wordt gebruikt (zie het voorbeeld in paragraaf 2.4.6.), is het energierendement zeer hoog: ongeveer 89 %.

3.4. Stroomrendement van een accu

Wanneer een accu wordt geladen moet er meer Ah in de accu worden "gepompt" dan tijdens de eerstvolgende ontlading kan worden teruggehaald. Dit wordt het stroomrendement genoemd, of ook wel het Ah- of Coulombrendement ($1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C}$).

Het stroomrendement van een accu is bijna 100 % zolang er geen gasontwikkeling plaatsvindt.

Gasontwikkeling betekent dat een deel van de laadstroom niet in chemische energie wordt omgezet, die in de platen wordt opgeslagen, maar wordt gebruikt om water in zuurstof- en waterstofgas om te zetten (dit geldt ook voor het "alleen zuurstof" einde van de laadfase van een gesloten accu, zie paragraaf 2.3.2.). Alleen de "ampère-uren" die in de platen zijn opgeslagen kunnen tijdens de eerstvolgende ontlading worden teruggewonnen.

De omvang van het verlies en dus ook het stroomrendement is afhankelijk van:

A. Het type accu: weinig gasontwikkeling = hoog stroomrendement.

B. De manier waarop de accu wordt geladen. Als een accu voornamelijk in gedeeltelijk geladen toestand wordt gebruikt (zie het voorbeeld in paragraaf 2.4.6.) en slechts af en toe volledig wordt geladen, zal het gemiddelde stroomrendement hoger zijn dan wanneer een accu na elke ontlading volledig wordt geladen.

C. Laadstroom en spanning. Wanneer met hoge stroom wordt geladen en daardoor ook met een hoge spanning en bij een hoge temperatuur, begint de gasontwikkeling eerder en is deze intensiever. Hierdoor neemt het stroomrendement af (en ook het energierendement).

In de praktijk varieert het stroomrendement van 80 % tot 95 %. Een accumonitor moet rekening houden met het stroomrendement, anders zal de aangegeven waarde te optimistisch zijn. Als het stroomrendement van tevoren handmatig wordt ingesteld is het raadzaam om eerst een lage waarde te kiezen, bijvoorbeeld 85 %, en dit naar praktijk en ervaring later bij te stellen.

3.5. Effect van de ontladstroom op de capaciteit

Zoals in paragraaf 2.4.3 al werd besproken, is de effectieve capaciteit van een accu afhankelijk van de ontladstroom. Hoe sneller de ontlading, hoe minder capaciteit beschikbaar zal zijn.

In 1897 ontdekte de wetenschapper Peukert, dat de relatie tussen de ontladstroom I en de onlaadtijd T (van volledig geladen tot volledig ontladen) bij benadering als volgt kan worden omschreven:

$$C_p = I^n \times T$$

waar C_p een constante is (de Peukert-capaciteit) en de n de exponent van Peukert genoemd wordt. De exponent van Peukert is altijd groter dan 1. Hoe groter n is, hoe slechter de accu bij een hoge ontladstroom presteert.

De exponent van Peukert kan als volgt worden berekend op basis van metingen gedaan op een accu of op basis van onlaadtabels of -grafieken:

Als we de onlaadtijd T_1 and T_2 vaststellen of meten voor twee zeer verschillende ontladstromen I_1 en I_2 , dan:

$$C_p = I_1^n \times T_1 = I_2^n \times T_2$$

en daarom:

$$n = \log(T_2 / T_1) / \log(I_1 / I_2)$$

Zoals uit de tabellen van paragraaf 2.4.3 blijkt, kan de verhoging van de ontladstroom van $C / 20$ naar $C / 1$ (= het verhogen van de ontladstroom van een accu van 200 Ah van $200 / 20 = 10$ A naar $200 / 1 = 200$ A) de beschikbare capaciteit wel met 50% verminderen!

Een accumonitor moet daarom de capaciteit voor de ontladsnelheid compenseren.

In de praktijk is dit zeer gecompliceerd, omdat de belasting van een serviceaccu in de loop van de tijd kan variëren.

3.6. Leidt een hoge ontladstroom tot capaciteitsverlies?

In paragraaf 2.4.3 wordt een voorbeeld vermeld van een accu waarvan de nominale capaciteit bij een ontlading in 20 uur 200 Ah was en dus $C_{20} = 200$ Ah. De bijbehorende ontladstroom is:

$$I_{20} = C_{20} / 20 = 10 \text{ A}$$

Bij een ontladstroom van 200 A was de accu in 30 minuten leeg. Dus hoewel we begonnen met een accu van 200 Ah was deze na de ontlading van slechts 100 Ah al leeg.

Dit betekent niet dat bij een ontladstroom van 200 A, het capaciteitsverschil van 100 Ah

($C_{20} - C_1 = 200 - 100 = 100$ Ah) is "verdwenen", maar alleen dat het chemische proces (diffusie, zie par. 2.2.3.) zich te langzaam voltrekt, waardoor de spanning onacceptabel laag wordt. Een accu die met een stroom van 200 A ontladen wordt en in 30 minuten "leeg" is zal daarom ook weer (bijna) vol zijn na laden met 100 Ah, terwijl dezelfde accu die wordt ontladen met $I_{20} = 10$ A en die in 20 uur leeg is weer bijna vol zal zijn na laden met 200 Ah.

Een accu die met hoge stroom is ontladen kan zich zelfs herstellen en de resterende capaciteit kan worden benut nadat de accu een paar uur of een dag met rust is gelaten.

3.7. Andere nuttige eigenschappen van een accumonitor

Naar mijn mening zijn het tellen van bijzondere gebeurtenissen en gegevensvastlegging zeer nuttige functies van een accumonitor.

3.7.1. Tellen van bijzondere gebeurtenissen

Tellen van bijzondere gebeurtenissen betekent dat specifieke gebeurtenissen, vooral gebeurtenissen die mogelijk schadelijk kunnen zijn of die nodig zijn voor het onderhoud van de accu in het geheugen van de accumonitor worden opgeslagen.

Deze gebeurtenissen kunnen zijn:

- teveel spanning
- te weinig spanning
- aantal laad/ontlaadcycli
- 100 % ontlading
- 100 % lading

3.7.2. Gegevensvastlegging

Gegevensvastlegging betekent dat, naast specifieke gebeurtenissen, de status van de accu met regelmatige tussenpozen wordt vastgelegd, zodat de gebruiksgeschiedenis op een later tijdstip kan worden weergegeven.

4. ACCU'S LADEN: DE THEORIE

4.1. Inleiding

Het zou gemakkelijk zijn om het laden van accu's te beschrijven als er één universeel recept voor bestond, onafhankelijk van de gebruiksomstandigheden en het type accu. Maar dat is helaas niet zo.

Een factor die het nog ingewikkelder maakt is het feit dat er vaak meer dan één laadapparaat op de accu is aangesloten en dat de netto laadstroom onbekend is vanwege ook op de accu aangesloten verbruikers.

Laden met constante spanning is de beste manier om de invloed van de verbruikers zoveel mogelijk te elimineren. Hier is de bekende 3 traps laadkarakteristiek uit voort gekomen, met een stroombegrensd fase en vervolgens 2 spanningslimieten, de absorptiespanning en de float- of druppellaadspanning.

In paragraaf 5.3.2 wordt een door Victron Energy ontwikkelde verfijning van deze laadkarakteristiek beschreven: de **adaptieve** laadkarakteristiek.

4.2. Laden in drie stappen (I U•U)

4.2.1. Bulkladen

In het begin van de laadcyclus van een accu stijgt de spanning snel naar ca. 2.1 V / cel (12.6 V voor een 12 V accu en 25.2 V voor een 24 V accu). De spanning stijgt daarna langzaam door tot de absorptiespanning is bereikt. Gedurende de bulkfase van de laadcyclus accepteert de accu alle aangeboden laadstroom: de laadstroom wordt begrensd door de laadapparatuur.

Voor grote accubatterijen is het raadzaam om de stroom tot C / 5 te beperken of, nog beter, tot C / 10, wat betekent dat 10 tot 20 % van de totale capaciteit per uur wordt geladen, bijvoorbeeld 100 A tot 200 A voor een accu van 1000 Ah.

Minder dure, kleinere accu's worden vaak met een relatief hogere stroom geladen, bijvoorbeeld C / 3, hoewel dit de levensduur van de accu kan verkorten.

Een accu accepteert alle aangeboden laadstroom tot deze ongeveer 80 % geladen is. Dan wordt de absorptiespanning bereikt. Vanaf dat moment zal de accu, in plaats van alle "aangeboden" stroom te accepteren steeds minder stroom opnemen (absorberen) naarmate het laden vordert. Om deze reden wordt deze eerste spanningslimiet de absorptiespanning genoemd en heet de tweede fase van de laadcyclus de absorptiefase.

Een hoge bulklaadstroom leidt tot temperatuurverhoging van de accu, zorgt voor meer gasontwikkeling en een langere benodigde absorptietijd om de accu volledig te laden. Met andere woorden: een te hoge laadstroom is niet erg effectief en verkort de laadtijd slechts in beperkte mate.

In elk geval moet de laadstroom tot C / 5 of minder worden beperkt zodra de gasspanning is bereikt (bij 20°C is de gasspanning ca. 2.4 V / cel, dwz 14.4 V resp. 28.8 V). Anders zal de actieve massa door overmatige gasontwikkeling uit de platen worden geduwd.

4.2.2. Absorptieladen

Wanneer de absorptiespanning is bereikt wordt het laden beperkt tot de hoeveelheid stroom die de accu bij deze spanning opneemt. Tijdens de absorptiefase neemt de stroom gestaag af terwijl de accu de volledig geladen toestand bereikt.

Zoals in par. 2.2.3 werd beschreven, betekent het laden (en ontladen) van een accu dat er een diffusieproces moet plaatsvinden. Het diffusieproces verklaart veel over het laden en ontladen van accu's:

- Als een accu snel maar ondiep is ontladen, heeft er weinig diffusie diep binnenin het actieve materiaal plaatsgevonden en is het chemische proces beperkt gebleven tot het oppervlak van de platen. Om de accu weer te laden is dan een kortstondige of zelfs helemaal geen absorptieperiode nodig (de accu van een auto wordt bij een vaste waarde van 14 V geladen). Om te herstellen van een langdurige en diepe ontlading is een lange absorptieperiode nodig om al het actieve materiaal binnenin de platen opnieuw om te zetten.
- Startaccu's met dunne platen hebben een minder lange absorptieperiode nodig dan accu's met dikke platen of buisjesplaten.
- De benodigde absorptietijd wordt korter naarmate een hogere absorptiespanning wordt gekozen, omdat toenemende spanning leidt tot sterkere elektrische velden die de diffusiesnelheid verhogen. Naarmate de absorptiespanning verhoogd wordt neemt de gasontwikkeling echter toe totdat uiteindelijk het actieve materiaal uit de platen zal worden gedrukt. Bij gesloten accu's zal gas gaan ontsnappen waardoor de elektrolyt zal uitdrogen.

Nadere uitwerking van het bovenstaande leidt tot het volgende:

1) **Natte loodantimoon accu's**

Hier hebben we te maken met vrij ruime absorptiespanning grenzen, variërend van 2.33 V per cel (14 V) en een lange absorptietijd tot 2.6 V per cel (15.6 V) en een veel kortere absorptietijd. Om overmatige gasontwikkeling te voorkomen, moet de laadstroom boven de gasspanning (2.4 V / cel) beperkt worden tot maximaal 10 % (maar 5 % is veel beter) van de capaciteit van de accu: bijvoorbeeld 40 A voor een accu van 400 Ah. Dit wordt bereikt door stroombegrenzing van de laadapparatuur of door de snelheid waarmee de laadspanning toeneemt te beperken tot ongeveer 0.1 V per cel en per uur (dwz 0.6 V per uur voor 12 V accu, resp. 1.2 V per uur voor een 24 V accu). Het is ook belangrijk te weten dat accu's niet volledig hoeven te worden geladen na elke ontlading. Het is heel acceptabel om gemiddeld tot 80 % of 90 % te laden (gedeeltelijke lading, bij voorkeur met enige gasontwikkeling om stratificatie te beperken) en de accu bijvoorbeeld één keer per maand volledig te laden.

2) De **opgerolde cel accu** is in een apart geval, omdat deze accu gesloten is en toch ruime absorptiespanning grenzen accepteert, van 14 V tot 15 V.

3) Andere **VLRA-accu's** hebben een lagere absorptiespanning grens die **nooit mag worden overschreden**. Bij te hoge spanning zal gas ontsnappen via de veiligheidsventielen, waardoor de accu zal uitdrogen..

4.2.3. **Floatladen of druppelladen**

Nadat de accu volledig is geladen wordt de spanning verlaagd om corrosie en gasontwikkeling zo veel mogelijk te beperken. Daarbij moet de spanning wel hoog genoeg blijven om te compenseren voor zelfontlading, d.w.z. om de accu volledig geladen te houden. Te veel spanning leidt tot versnelde veroudering vanwege corrosie van de positieve platen. De snelheid waarmee het rooster van de positieve platen corrodeert zal ruwweg verdubbelen met elke toename van de celspanning met 50 mV (0.3 V respectievelijk 0.6 V voor accu's van 12 V en 24 V). Daar staat tegenover dat de accu bij onvoldoende spanning zal niet volledig geladen blijven, wat uiteindelijk tot sulfatering zal leiden.

Met betrekking tot de druppellaadspanning moeten we onderscheid maken tussen natte en VLRA-accu's:

1) De aanbevelingen voor het druppelladen van **natte accu's** variëren van 2.15 V tot 2.33 V per cel (12.9 V tot 14 V voor een 12 V accu). De types natte accu die hier worden besproken zijn **niet bedoeld voor druppelladen gedurende langere tijd** (d.w.z. meerdere maanden of jaren). Druppelladen met een relatief hoge spanning zal de levensduur verkorten vanwege corrosie van de roosters van de positieve platen, en accu's met een hoog antimoongehalte zullen regelmatig met gedestilleerd water moeten worden bijgevuld. Druppelladen met een lage spanning, bijvoorbeeld 2.15 V per cel, vermindert veroudering en gasontwikkeling, maar er is dan wel een regelmatige "opfrislanding" nodig op een hogere (absorptie) spanning om de accu volledig geladen te houden.

2) Alle genoemde **VLRA-accu's** zijn geschikt voor druppelladen gedurende langere tijd. Enkele onderzoeken hebben echter uitgewezen dat een behandeling die lijkt op die welke hier voor natte accu's is voorgesteld ook de levensduur van VLRA accu's aanzienlijk verlengt (zie bijvoorbeeld "Batterie Technik" door Heinz Wenzl, Expert Verlag, 1999).

Uit de volgende tabel blijkt hoeveel water er door gasontwikkeling verloren raakt bij een relatief nieuwe accu met laag antimoon gehalte.

Belangrijk: de gasontwikkeling neemt toe naarmate de accu ouder wordt, en accu's met meer antimoon verbruiken 2 tot 5 keer zoveel water!

	Spanning per cel (V)	Accu-spanning (V)	Gas ontwikkeling per 100 Ah	Water verbruik per 100 Ah	Bijvul interval	Water verlies per laadcyclus	Ah verlies per 100 Ah accucapaciteit
Open-klemspanning	2.13	12.8	20 cc / uur	0.1 l / jaar	5 jaar		44 / jaar
Float	2.17	13	25 cc / uur	0.1 l / jaar	5 jaar		54 / jaar
Float	2.2	13.2	60 cc / uur	0.3 l / jaar	1.5 jaar		130 / jaar
Float	2.25	13.5	90 cc / uur	0.4 l / jaar	1 jaar		200 / jaar
Float	2.3	13.8	150 cc / uur	0.6 l / jaar	10 maand		300 / jaar
Absorptie	2.33	14	180 cc / uur	0.8 l / jaar	7 maand	2 cc	2 / cyclus
Absorptie	2.4	14.4	500 cc / uur	2.2 l / jaar	3 maand	3 cc	3 / cyclus
Absorptie	2.45	14.7	1 l / uur	4.2 l / jaar		4 cc	4 / cyclus
Absorptie	2.5	15	1.5 l / uur	6.5 l / jaar		6 cc	6 / cyclus

Gasontwikkeling en waterverbruik zijn gebaseerd op een 6 cel (= 12 V) accu. Het interval voor het bijvullen is gebaseerd op 0,5 l waterverlies per 100 Ah. Het wateroverschot in de accu is ca. 1 l / 100 Ah.

De formules:

- a) 1g water wordt ontleed in 1.85 l zuurstof- + waterstofgas;
- b) 1 Ah verlies vanwege gasontwikkeling wekt 3.7 l gas op in een 6 cel (= 12 V) accu.

Uit de tabel blijkt dat een druppellaadspanning van 13.5 V (13.5 V is een vaak aanbevolen spanning voor de hier besproken natte accu's) een redelijk compromis is, omdat een lagere spanning niet geheel compenseert voor zelfontlading en een hogere spanning zal leiden tot vaker dan eens per jaar bijvullen en versnelde veroudering tgv corrosie.

Naar mijn mening is het beter om, in plaats van te proberen het evenwicht te vinden tussen zelfontlading en gasontwikkeling, de accu te ontkoppelen en eens in de paar maanden bij te laden, dan wel om de druppellaadspanning tot een zeer laag niveau te reduceren, bijvoorbeeld 2.2 V per cel (13,2 V respectievelijk 26,4 V), en de accu regelmatig met een hogere spanning bij te laden, zie hiervoor paragraaf 5.3.2.

4.3. Egaliseren

Als een accu niet voldoende wordt geladen, leidt dit tot veroudering om de volgende redenen:

- sulfatering
- stratificatie (alleen natte accu's, zie par. 2.3.6)
- onbalans van de cellen (zie par. 2.4.6).

Accu's zullen in het algemeen hun volledig geladen toestand bereiken tijdens de absorptie fase of na langere tijd druppelladen.

Indien ze enige tijd in gedeeltelijk ontladen toestand zijn gebruikt zullen ze herstellen door:

- herhaaldelijk volledig doorlopen van de laadcyclus
- gedurende langere tijd absorptie- of druppelladen;
- een echte egalisatielading, zoals hieronder wordt beschreven.

In het bijzonder tractieaccu's kunnen periodiek een egalisatielading nodig hebben.

Een egalisatielading wordt gegeven door eerst de accu zoals gebruikelijk te laden en vervolgens het laden met een beperkte stroom voort te zetten (3 % tot 5 % van de Ah-capaciteit van de accu, d.w.z. 3 tot 5 A voor een 100 Ah accu) waarbij de spanning zal toenemen tot 15-16 V (30-32 V voor een 24 V accu). De egalisatie lading moet iha enkele uren duren, tot het soortelijk gewicht (SG) ook in de zwakste cel niet meer toeneemt. Zorg er gedurende deze periode voor dat de accu geïsoleerd is van alle apparatuur die gevoelig kan zijn voor overspanning.

Wanneer moet een accu worden geëgaliseerd?

Dit is afhankelijk van het type en het gebruik. Voor accu's met een hoog antimoongehalte is de beste manier om hier achter te komen het SG na een normale lading te controleren:

- Als alle cellen gelijk zijn en een waarde opleveren van 1.28 is egalisatie niet nodig;
- Als de waarde van alle cellen zich tussen de 1.24 en 1.28 bevindt is het goed de accu te egaliseren, maar dit is niet dringend nodig;
- Als het SG van sommige cellen minder is dan 1.24 wordt egalisatie aanbevolen.
- Als alle cellen een SG hebben van minder dan 1.24 dan heeft de accu te weinig lading en moet de absorptietijd worden verlengd of de absorptiespanning worden verhoogd.

Bij VLRA-accu's kan het SG niet gemeten worden en bij natte accu's met een laag antimoongehalte is de aangegeven waarde niet betrouwbaar. De gemakkelijkste manier om te controleren of deze accu's echt 100% geladen zijn is om de laadstroom tijdens het absorptieladen te volgen. De laadstroom moet gestaag afnemen en zich vervolgens stabiliseren: dit is een teken dat de chemische transformatie van de actieve massa is voltooid en dat de belangrijkste resterende chemische activiteit gasontwikkeling is (het afbreken van water in zuurstof en waterstof).

4.4. Temperatuurcompensatie

Zoals al in par. 2.5.9 werd vermeld speelt de temperatuur een grote rol bij het laden van accu's. De gasspanning en daardoor ook de optimale absorptie en druppellaadspanning zijn omgekeerd evenredig aan de temperatuur. Dit betekent dat een koude accu bij een vaste laadspanning onvoldoende geladen zal worden en dat een warme accu teveel geladen zal worden.

Het laden van een warme accu zonder temperatuurcompensatie kan tot een instabiele situatie leiden (eng: thermal runaway):

Omdat de gasspanning bij een stijgende temperatuur daalt, neemt de absorptie- of druppellaadstroom toe en de accu wordt nog heter, enz. Dit leidt al snel tot vernietiging van de accu (de overmatige gasontwikkeling duwt de actieve massa uit de platen) en er bestaat explosiegevaar tgv interne kortsluiting en de aanwezigheid van grote hoeveelheden zuurstof- en waterstofgas.

De laadspanning aangegeven door Europese accufabrikanten geldt bij een accutemperatuur van 20°C en kan constant worden gehouden zolang de ook temperatuur van de accu redelijk constant blijft (15°C tot 25°C).

Buiten dit temperatuurgebied is temperatuurcompensatie aan te raden.

Hoewel het advies van fabrikanten enigszins verschilt is een temperatuurcompensatie van $-4 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$ per cel een algemeen aanvaard gemiddelde. Dit betekent $-24 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$ voor een accu van 12 V en $-48 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$ voor een accu van 24 V.

Indien de fabrikant een absorptiespanning vermeldt van bijvoorbeeld 28.2 V bij 20°C, dan moet de absorptiespanning bij 30°C verlaagd worden naar 27.7 V. Dit is een verschil van 0.5 V dat zeker niet moet worden genegeerd.

Wanneer, naast een omgevingstemperatuur van 30°C, de interne temperatuur van de accu nog eens 10°C stijgt, wat vrij normaal is tijdens het laden, dan moet de absorptiespanning naar 27.2 V worden verlaagd. Zonder temperatuurcompensatie zou de laadspanning 28.2 V zijn geweest, waardoor een dure gel of AGM accubank snel zou zijn vernield!

Het bovenstaande betekent dat **temperatuurcompensatie belangrijk is**, vooral voor grote, dure VRLA accu's.

4.5. Overzicht

De volgende tabel geeft een overzicht van de manier waarop accu's na een ontlading van ca. 50 % kunnen worden geladen. In de praktijk kunnen aanbevelingen per fabrikant verschillen en zijn laadvoorschriften ook afhankelijk van het gebruik van de accu. **Vraag altijd uw acculeverancier om advies!**

Type	Legering	Absorptietijd bij 20°C	Floatspanning bij 20°C
Auto	Antimoon (1.6 %)	4 uur bij 2.50 V / cel (15.0 V) 6 uur bij 2.45 V / cel (14.7 V) 8 uur bij 2.40 V / cel (14.4 V) 10 uur bij 2,33 V / cel (14 V)	2.33 V / cel (14 V) na een paar dagen verlagen tot: 2.2 V / cel (13.2 V)
Opgerolde cel	Zuiver lood	4 uur bij 2.50 V / cel (15.0 V) 8 uur bij 2.45 V / cel (14,7 V) 16 uur bij 2.40 V / cel (14.4 V) 1 week bij 2.30 V / cel (13.8 V)	2.3 V / cel (13.8 V)
Semi-tractie	Antimoon (1.6 %)	5 uur bij 2.50 V / cel (15.0 V) 7 uur bij 2.45 V / cel (14.7 V) 10uur bij 2.40 V / cel (14.4 V) 12 uur bij 2,33 V / cel (14 V)	2.33 V / cel (14 V) na een paar dagen verlagen tot: 2.2 V / cel (13.2 V)
Tractie (buisjesplaat)	Antimoon (5 %)	6 uur bij 2.50 V / cel (15.0 V) 8 uur bij 2.45 V / cel (14.7 V) 10 uur bij 2.40 V / cel (14.4 V)	2.3 V / cel (13.8 V) na een paar dagen verlagen tot: 2.2V / cel (13.2 V)
VRLA-gel Sonnenschein Dryfit A200	Calcium	4 uur bij 2.40 V / cel (14.4 V) voltage mag niet worden overschreden!	2.3 V / cel (13.8 V)
VRLA-gel Sonnenschein Dryfit A600	Calcium	4 uur bij 2.34 V / cel (14.04 V) voltage mag niet worden overschreden!	2.25 V / cel (13.5 V)

N.B.:

- 1) Als er geen walstroom beschikbaar is worden accu's in op een jacht vaak zo snel mogelijk geladen, met een verkorte of helemaal geen absorptieperiode (gebruik bij gedeeltelijk ontladen toestand). Dit is acceptabel, mits de accu regelmatig wel voor de volle 100 % wordt geladen (zie par. 4.3).
- 2) Als de accu wordt geladen met een spanning die hoger is dan de gasspanning, moet de stroom worden beperkt tot maximaal 5 % van de Ah-capaciteit van de accu, of het laadproces moet zorgvuldig worden gevolgd en de spanning verlaagd als de stroom tot meer dan 10 % van de Ah-capaciteit stijgt. Een oplossing voor dit probleem is de adaptieve laadkarakteristiek, zie par. 5.3.2.
- 3) Bij druppelladen van accu's met 2,2 V per cel is een regelmatige "opfrislading" nodig.
- 4) Een opmerking betreffende levensduur en teveel laden:
Start- of boegschroefaccu's worden vaak parallel aan de hoofdaccu geladen (zie par. 5.2). Het gevolg is dat deze accu's vaak met een hoge spanning (15 V of zelfs nog meer) worden geladen, hoewel ze al volledig geladen zijn. Als dit het geval is mogen gesloten accu's niet voor dit doel worden gebruikt, omdat ze dan zouden gaan gassen en uitdrogen. Dit geldt niet voor de gesloten opgerolde cel accu die tot 15 V laadspanning verdraagt.
Natte en opgerolde cel accu's zullen wel overleven, maar verouderen sneller. De belangrijkste verouderingsfactor daarbij is corrosie van het rooster van de positieve platen. De corrosiesnelheid verdubbelt bij elke spanning toename met 50 mV per cel. Dit betekent dat bijvoorbeeld een Optima opgerolde cel accu, die een levensduur heeft van 10 jaar bij de aanbevolen druppellaadspanning van 13.8 V, 4 keer zo snel zou verouderen bij 15 V ($((15 - 13.8) / 6) / 0.05 = 4$), waardoor de levensduur slechts 2.5 jaar zou zijn wanneer de accu **constant** met 15 V zou worden geladen. In de praktijk is dat natuurlijk niet het geval: de hoge laadspanning doet zich alleen voor tijdens de absorptielaadperiode van de service accu. Maw: ondanks frequent overladen zal de levensduur meevallen. Soortgelijke resultaten gelden voor natte accu's.

4.6. Conclusie: hoe moet een accu worden geladen?

Zoals al eerder werd vermeld is er geen simpel recept dat voor alle accu's en alle gebruiksomstandigheden geldt. En bestaat er geen grotere variëteit aan gebruiksomstandigheden en typen accu's dan aan boord van een jacht.

Laten we, om een beter idee te krijgen van de manier waarop accu's worden gebruikt en wat dit betekent voor het laden, weer het voorbeeld uit paragraaf 2.4. nemen. Laten we aannemen dat het jacht 3 accu's aan boord heeft: een serviceaccu, een startaccu en een boegschroefaccu.

Hoe worden deze verschillende accu's gebruikt en hoe moeten ze worden geladen?

4.6.1. De serviceaccu

In par. 2.4. en werden drie gebruiksomstandigheden beschreven:

1) Cyclisch gebruik, in gedeeltelijk geladen toestand, tijdens het zeilen of terwijl het jacht voor anker ligt (laden van de accu met de dynamo van de hoofdmotor of met een dieselgenerator). In deze omstandigheden wil men de accu zo snel mogelijk laden. Temperatuurcompensatie is noodzakelijk om vroegtijdige veroudering vanwege oververhitting en overmatige gasontwikkeling te voorkomen.

2) Een combinatie van druppelladen en kortstondige, ondiepe ontladingen tijdens varen op de motor of wanneer het jacht in de haven ligt (walstroom en toepassing van het DC concept). Het risico hier is dat een 3-traps dynamoregelaar (tijdens het varen) of een acculader (indien aangesloten op walstroom) door deze ondiepe ontladingen telkens overschakelt op bulkladen met daarop volgend een vaste absorptie periode. Hierdoor kan een situatie ontstaan waarbij de accu bijna voortdurend aan absorptieladen wordt onderworpen. Daarom moet igv ondiepe ontladingen de duur van de absorptiefase sterk verkort worden. Zie hiervoor adaptief laden, par. 5.3.2.

3) De accu wordt gedurende lange periodes losgekoppeld of onder druppellaadspanning achtergelaten, bijvoorbeeld tijdens de winterperiode. Zoals in par. 4.2.3 werd besproken zullen de meeste **natte accu's** snel verslechteren (corrosie) als ze lange tijd met 2.3 V (13.8 V) per cel worden geladen. Op basis van mijn persoonlijke ervaring en vele discussies met jacht- en werfeigenaren geef ik er de voorkeur aan om zowel natte accu's als **gel accu's** gedurende de winterperiode los te koppelen dan wel te onderhouden met een druppellaadspanning van ca. 13.2 V en een periodieke opfrislanding.

4.6.2. De startaccu

De startaccu wordt op 2 manieren gebruikt:

- Ondiepe ontlading door het één of twee keer per dag starten van de motor.
- Helemaal geen ontlading. Het beste zou zijn de accu dan ook niet te laden, behalve af en toe een absorptielading.

In de praktijk wordt de startaccu echter vaak parallel met de serviceaccu geladen, wat acceptabel is, mits het juiste type accu wordt gebruikt en enige verkorting van de levensduur wordt geaccepteerd (zie noot 4, par. 4.5).

4.6.3. De boegschroefaccu

Als de boegschroef intensief is gebruikt kan de ontlading diep zijn en moet de accu ook weer snel geladen worden. In het algemeen is de meest praktische oplossing om de boegschroefaccu gelijktijdig met de serviceaccu te laden. Vaak worden opgerolde cel accu's gebruikt vanwege hun zeer hoge piekstrom capaciteit. Deze accu's accepteren een hoge laadspanning, zie noot 4, par. 4.5.

5. ACCU'S LADEN MET EEN DYNAMO OF EEN ACCULADER

5.1. De wisselstroomdynamo

De hoofdmotor van een jacht is normaliter voorzien van een standaard wisselstroomdynamo* met ingebouwde regelaar en temperatuurcompensatie. De temperatuur wordt gemeten in de regelaar zelf. Dit is gebaseerd op de automobiel industrie, waar de accutemperatuur ongeveer gelijk is aan de temperatuur van de regelaar. In auto's is de accu bovendien bijna altijd volledig geladen. Alleen tijdens het starten van de motor wordt de accu in geringe mate ontladen. Vervolgens levert de dynamo voldoende vermogen, ook bij een stationair draaiende motor, om alle verbruikers van stroom te voorzien en de accu weer bij te laden. Omdat de accu eigenlijk nooit diep wordt ontladen en er meestal veel laadtijd beschikbaar is, is de in hoofdstuk 4 besproken absorptie fase overbodig. De dynamo laadt met een van het toerental afhankelijke stroom, totdat de ingestelde druppellaadspanning is bereikt. Daarna wordt de accu geladen op constante spanning. De spanning is meestal afgesteld op 2,33 V / cel, dwz 14 V voor 12 V-systemen en 28 V voor 24 V-systemen. Deze laadmethode werkt uitstekend onder de volgende voorwaarden:

- de accu is een vlakke plaat startaccu;
- de accu is bijna altijd volledig geladen;
- het temperatuurverschil tussen dynamo en accu is beperkt;
- de spanningsval over de kabel tussen accu en dynamo is verwaarloosbaar (d.w.z. kleiner dan 0,1V, met inbegrip van schakelaars, isolatoren, enz.).

Zodra aan een van de bovenstaande voorwaarden niet meer wordt voldaan kunnen er problemen ontstaan. In de volgende paragrafen wordt de praktijk van het laden van een serviceaccu stap voor stap besproken. Voor een uitputtende bespreking van wisselstroomdynamo's dynamoregelaars, isolatoren en andere bijbehorende apparatuur adviseer ik u Nigel Calder's standaard werk "Boatowners Mechanical and Electrical Manual" te lezen, en ook de websites van Ample Power (amplepower.com), Balmar (balmar.net) en Heart Interface (xantrex.com) te bekijken.

*In een wisselstroomdynamo zijn gelijkrichtdiodes ingebouwd zodat er geen wisselstroom maar gelijkstroom uit komt

5.2. Als de dynamo meer dan één accu moet laden

5.2.1. Inleiding

Een jacht heeft op zijn minst twee accu's: één om de hoofdmotor te starten en één huis- (of hulp- of service-) accu. Om ervoor te zorgen dat de motor altijd gestart kan worden, worden alle accessoires (navigatieapparatuur, verlichting, stuurautomaat, koelkast, enz.) op de serviceaccu aangesloten. De startaccu mag alleen voor de startmotor van de hoofdmotor worden gebruikt en mag absoluut nooit leeg raken, want dan kan de motor niet meer worden gestart.

Vaak is er een derde accu aan boord, de boegschroefaccu en er kan zelfs een vierde zijn, de accu voor de navigatie en communicatie apparatuur. De accu's zijn door middel van relais, diode isolatoren, of anderszins van elkaar gescheiden. In grotere systemen heeft de startaccu vaak een eigen dynamo. De accuspanning kan ook verschillen, bijvoorbeeld 12 V voor start- en navigatieaccu's, en 24 V voor de service- en boegschroefaccu's.

5.2.2. Het probleem

Als een standaard dynamo uit de auto industrie wordt gebruikt om verscheidene accu's gelijktijdig te laden ontstaan de volgende problemen:

- Op een schip zijn de kabellengtes vaak veel langer dan in auto's, waardoor er een grotere spanningsval ontstaat tussen de dynamo en de accu (voorbeeld: de spanningsval over een kabel met een doorsnede van 10 mm² en 5 meter lengte is 0.5 V bij een stroom van 50 A).
- Diode laadisolators veroorzaken extra spanningsval: 0.4 tot 0.8 V voor silicium diodes en 0.1 tot 0.4 V voor FET-transistoren die als diode worden gebruikt.
- De dynamo in de motorruimte registreert een omgevingstemperatuur van 40 °C of zelfs hoger terwijl de serviceaccu lager in het schip veel kouder is, bijv. 20 °C. Dit resulteert in een voor de accu te lage laadspanning tgv temperatuur compensatie.
- De serviceaccu wordt meestal behoorlijk diep ontladen en moet met een hoge (absorptie) spanning worden geladen. Dit is vooral het geval als de dynamo op de hoofdmotor de enige stroombron is en elke dag kortstondig wordt gebruikt om de accu's te laden.
- De startaccu is echter bijna altijd volledig geladen en heeft geen absorptielading nodig.
- Vaak worden verschillende soorten accu's gebruikt voor het starten, de boegschroef en als serviceaccu. Deze verschillende soorten accu's hebben elk hun eigen laadrecept.

5.2.3. Veel verschillende oplossingen

Het zou overdreven zijn om te stellen dat er net zoveel oplossingen zijn als boten, maar er zijn zeker veel manieren om de bovenstaande problemen in meer of mindere mate op te lossen. Verscheidene daarvan, maar zeker niet alle, worden hierna besproken:

5.2.3.1 Eenvoudig en niet duur: microprocessor gestuurde accuscheiders

De startaccu wordt direct aangesloten op de dynamo. Tussen de dynamo en de serviceaccu wordt een microprocessor gestuurde accuscheider geplaatst (zie bijv. de Cyrix accuscheiders van Victron Energy). Wanneer 1 van beide accu's geladen wordt (de start accu door de dynamo, of de service accu met een acculader) en de spanning stijgt tot bijna 14 V of 28 V, dan zorgt de microprocessor ervoor dat het relais sluit, zodat beide accu's parallel geladen worden. Zodra de spanning daalt omdat er ontlading plaatsvindt, opent het relais weer en worden de accu's gescheiden.

Deze oplossing is eenvoudig en niet duur: de dynamo hoeft niet te worden gemodificeerd of vervangen. Het nadeel is een wat langere oplaadtijd van de serviceaccu, omdat de laadspanning aan de lage kant is. Vaak zal de motor, en daarmee het laadproces, gestopt worden lang voordat de accu vol is. Dit is geen bezwaar zolang de accu's regelmatig wel volledig geladen worden, bijvoorbeeld met een acculader wanneer er walstroom beschikbaar is.

De Cyrix accuscheiders zijn **bidirectioneel**: de spanning wordt op beide "+" aansluitingen gemeten en de laadstroom zal eenvoudigweg van de accu met hoogste laadspanning naar de accu met de lagere spanning lopen. Een voorbeeld: wanneer de dynamo is aangesloten op de startaccu en een acculader op de service accu, en de 2 accu's worden verbonden met een Cyrix, dan kunnen beide accu's geladen worden, zowel met de dynamo als met de acculader.

5.2.3.2 Dynamospanspanning verhogen

De meeste dynamo's met ingebouwde regelaar kunnen worden aangepast om een hogere spanning te leveren. Door een diode in serie met de spanningsmeting van de regelaar te plaatsen wordt de uitgangsspanning met ca. 0.6 V verhoogt.

Dit is een karwei voor de specialist, waar we hier niet verder op ingaan, maar het is een goedkope verbetering die samen met de in 5.2.3.1 beschreven oplossing de accu's sneller zal laden. Zware overlading is alleen een risico bij een zeer intensief dagelijks gebruik van de motor en zelfs dat probleem kan worden opgelost door de dynamo tijdelijk uit te schakelen (maar onderbreek **nooit** de verbinding tussen de dynamo en de accu terwijl de motor draait, want de resulterende spanningspiek kan de gelijkrichtdiodes in de dynamo beschadigen).

5.2.3.3 Een meertrapsregelaar met temperatuur- en spanningscompensatie

Als u voor een meertrapsregelaar besluit (bulk-absorptie-float, zie hoofdstuk 4), zou ik adviseren de beste te nemen en een model te kiezen met:

- Spanningsense. Door de laadspanning direct op de accu te meten wordt de spanningsval over de bekabeling en eventuele diode isolatoren automatisch gecompenseerd.
- Temperatuurcompensatie. Hiervoor is een temperatuursensor nodig, die op de serviceaccu moet worden gemonteerd.

5.2.3.4 De startaccu.

De in 5.2.3.2 en 5.2.3.3 voorgestelde oplossingen verbeteren het laden van de serviceaccu, maar wat te doen met de startaccu?

Laten we aannemen dat wanneer de hoofdmotor draait, de accu's gelijktijdig via relais, of een diode of FET-isolator worden geladen. Vrijwel alle laadstroom stroomt dan naar de service accu omdat deze accu de grootste capaciteit en de laagste inwendige weerstand heeft, en gedeeltelijk of geheel ontladen is. Dit betekent dat de spanningsval over de kabel van de dynamo naar de serviceaccu hoger zal zijn dan van de dynamo naar de startaccu. Het kan heel goed zijn dat om een absorptiespanning van bijvoorbeeld 14.4 V voor de serviceaccu te bereiken, de uitgangsspanning van de dynamo tot 15.4 V moet worden verhoogd (d.w.z. een spanningsval van 1 V van de dynamo naar de serviceaccu).

Met 15.4 V op de dynamo zou de spanning op de startaccu zeer wel 15 V (!) kunnen zijn, omdat slechts een klein percentage van de stroom naar de startaccu gaat en dus ook de spanningsval gering zal zijn. Het resultaat is dat de startaccu, die al volledig is geladen, teveel geladen wordt. Wat te doen?

- a) Verbeter de situatie door het spanningsverlies zo laag mogelijk te houden en laat het daarbij. De startaccu moet misschien eerder worden vervangen, afhankelijk van hoe vaak de hierboven genoemde omstandigheden zich voordoen en welk type startaccu wordt gebruikt. Een gel-accu wordt in deze omstandigheden niet aanbevolen, omdat overspanning uitdrogen tot gevolg heeft. Zie par. 4.5 voor een schatting van de levensduur van een accu als deze met een te hoge spanning wordt geladen.
- b) Voeg 1 of 2 diodes toe in de bekabeling naar de startaccu om de spanning te verlagen.
- c) Plaats een serieregelaar in de bekabeling naar de startaccu, bijvoorbeeld de "Eliminator" van Ample Power.
- d) Laad de startaccu met een aparte dynamo.

5.2.3.5 De boegschroefaccu

De opgerolde cel accu is zeer geschikt voor deze toepassing. Deze accu kan zeer hoge stromen leveren en kan tevens snel en met een hoge spanning geladen worden.

5.3. Acculaders: van wisselstroom naar gelijkstroom

5.3.1. Inleiding

In hoofdstuk 2, 3 en 4 hebben we besproken op welke manier accu's zouden moeten worden geladen en hoe accu's versneld verouderen als zij niet op de juiste manier worden geladen.

In paragraaf 5.2 bleek dat het laden van accu's met de dynamo van de hoofdmotor een kwestie van compromissen is.

Met acculaders is het iets minder ingewikkeld, omdat de meeste laders met een hoog uitgangsvermogen zijn voorzien van temperatuur- en spanningssensoren. Veel acculaders hebben ook 2 of 3 gescheiden uitgangen voor het gelijktijdig laden van 2 of 3 accu's en bijna allemaal hebben ze een 3 traps laadkarakteristiek.

Het is ook veel gemakkelijker om per accubank een lader te installeren dan meerdere dynamo's op de hoofdmotor te plaatsen.

5.3.2. Optimaal laden met een acculader

Ik hoop dat het in de voorgaande hoofdstukken duidelijk is geworden dat het laden van accu's zorgvuldig denken vereist.

In de nieuwe Phoenix laders van Victron Energy is alle kennis en ervaring zoals in dit boek beschreven samengebracht.

De laders hebben een adaptieve 4-traps laadkarakteristiek

Het microprocessorgestuurde 'adaptieve' accu management systeem kan ingesteld worden voor verschillende soorten accu's. De adaptieve functie past het laadproces automatisch aan het gebruik van de accu.

Door aanpassing van de absorptietijd zorgt de lader voor de juiste hoeveelheid lading

Bij geringe ontlading van de accu wordt de absorptietijd kort gehouden om overlading en overmatig gassen te voorkomen. Na een diepe ontlading wordt de absorptietijd automatisch verlengd om de accu volledig te laden.

Beperking van veroudering door overmatig gassen: begrensde spanningsstijging (*BatterySafe* functie)

Indien, om de laadtijd te verkorten, gekozen wordt voor een hoge laadstroom en ook een verhoogde laadspanning, dan zal de Phoenix lader nadat de gasspanning is bereikt de stijgsnelheid van de spanning begrenzen. Zo wordt overmatig gassen in de eindfase van de laadcyclus voorkomen.

Minder onderhoud en veroudering wanneer de accu niet gebruikt wordt: de opslagfunctie (*BatteryStorage* functie)

De Phoenix lader schakelt over op 'opslag' wanneer er gedurende meer dan 24 uur geen ontlading plaatsvindt. De spanning wordt dan verlaagd tot 2,2 V/cel (13,2 V voor een 12 V accu). De accu zal dan nauwelijks meer gassen en corrosie van de positieve platen wordt zoveel mogelijk beperkt. Eens per week wordt de spanning verhoogd tot absorptie niveau om de accu weer bij te laden; dit voorkomt stratificatie van de elektrolytoplossing en sulfatering van de platen.

Drie uitgangen om drie accu's te laden

De Phoenix laders hebben 3 uitgangen waarvan er 2 de volle uitgangsstroom kunnen leveren. De derde uitgang, bedoeld voor het laden van een startaccu, is begrensd op 4 A en heeft een iets lagere uitgangsspanning.

Temperatuurcompensatie

Een temperatuursensor die op de min-pool van de accu gemonteerd kan worden zorgt ervoor dat de laadspanning afneemt wanneer de accutemperatuur stijgt. Dit is bijzonder belangrijk voor Gel- en AGM-accu's, die anders mogelijk door overlading zouden uitdrogen.

'Voltage Sense': laadspanning meten op de accu of op het DC verdeelpunt

Om spanningsverlies door kabelweerstand te compenseren, zijn de Phoenix laders voorzien van 'Voltage Sense' zodat de accu altijd de juiste laadspanning krijgt.

5.3.3. Meerdere accu's laden

De problemen die zich dan voordoen zijn analoog aan die welke beschreven zijn voor de dynamo, zie paragraaf 5.2.2. De goedkoopste oplossing is een lader met meerdere uitgangen. De beste oplossing is een aparte acculader voor elke accu.

5.3.3.1. Meerdere accu's laden met 1 lader

Veel acculaders hebben 2 of 3 uitgangen die onderling gescheiden zijn door diodes. De spanning wordt geregeld aan de primaire kant van de diodes en is wat hoger afgesteld om de gemiddelde spanningsval over de diodes te compenseren. Met inbegrip van de bekabeling kan hierdoor, wanneer er veel stroom loopt, de spanningsval oplopen tot meer dan 1.5 Volt. Als de stroom gering is zal de spanningsval afnemen tot minder dan 0.5 V. Dit betekent dat een laadspanning van

bijvoorbeeld 14.4 V bij lage stroom daalt tot 13.4 V bij de volle laadstroom. Dit is niet al te bezwaarlijk zolang de accu's regelmatig geladen worden zonder dat er tegelijkertijd veel stroom wordt afgenomen door diverse gebruikers. De beoogde laadspanning van 14.4 V kan namelijk alleen bereikt worden als de stroom tijdens de absorptie periode afneemt tot een lage waarde.

Temperatuurcompensatie

Temperatuur compensatie heeft slechts een beperkt effect omdat de verschillende accu's ook een verschillende temperatuur zullen hebben.

'Voltage sense'

Compensatie van de spanningsval door de laadspanning direct op het DC verdeelpunt of de klemmen van 1 van de aangesloten accu's te meten resulteert in nauwkeurig laden van die accu, en mogelijk overladen van de overige accu's.

5.3.3.2. Een aparte acculader per accubank

Dit is de beste, maar ook een dure oplossing.

5.3.3.3. Microprocessor gestuurde accuscheiders

Een goed compromis is nauwkeurig laden, inclusief temperatuur- en spanningcompensatie van de dure serviceaccu, en de overige accu's aansluiten op de service accu met microprocessor gestuurde accuscheiders. Een bijkomend voordeel is dat de dynamo van de hoofdmotor dan automatisch ook alle accu's zal laden, zie paragraaf 5.2.3.1.

6. ELEKTRISCHE APPARATUUR EN ENERGIEVERBRUIK

6.1. Inleiding

Nu we het een en ander weten over accu's en het laden van accu's is het tijd om te kijken waar de in de accu's opgeslagen energie voor gebruikt wordt. Om meer inzicht te krijgen in het energieverbruik van de verschillende verbruikers aan boord is het handig om in 3 verschillende categorieën te denken:

- **Continue verbruikers**; voorbeelden hiervan zijn de standby-stroom van de VHF of de SSB, en de koelkast en vriezer.
- **Langdurige verbruikers** (navigatieverlichting, stuurautomaat, kajuitverlichting, watermaker) die één of meerdere uren per dag stroom gebruiken.
- **Kortstondige verbruikers** (pompen, elektrische winches, boegschroef, magnetron, wasmachine, vaatwasmachine, elektrische kookplaat) die een paar seconden tot ca. een uur per dag elektriciteit gebruiken.

Naar mijn ervaring heeft iedereen, ik zelf inclusief, de neiging om het dagelijkse energieverbruik van continue en langdurige verbruikers te onderschatten en het energieverbruik van kortstondige verbruikers te overschatten.

6.2. Vermogen en energie

Het is belangrijk onderscheid te maken tussen (elektrisch-) vermogen en energie.

Vermogen is energie per seconde en wordt gemeten in Watt (W) of Kilowatt (1 kW = 1000 W).

Energie is vermogen vermenigvuldigd met tijd. Een accu slaat geen vermogen op, maar energie. Weinig vermogen, maar over een lange periode kan leiden tot veel verbruikte energie en een accu ongemerkt ontladen. Energie wordt o. a. gemeten in Watt-uren (Watt x uren, of Wh) of Kilowatturen (1 kWh = 1000 Wh).

Energie is tevens het product van de accucapaciteit (Ampère-uren) en spanning: $Wh = Ah \times V$ en $kWh = Ah \times V \times 1000$.

Dus een opgenomen vermogen van 2 kW gedurende 1 uur betekent een energie verbruik van $2 \text{ kW} \times 1 \text{ uur} = 2 \text{ kWh}$. Hierdoor zal $2 \text{ kWh} / 12 \text{ V} = 2000 \text{ Wh} / 12 \text{ V} = 167 \text{ Ah}$ aan een 12 V accu onttrokken worden.

Een vermogen van 2 kW gedurende 1 seconde (d.w.z. 1 / 3600 ste van één uur) zal slechts $(2000 / 3600) / 12 = 0.046 \text{ Ah}$ aan een 12 V accu onttrekken.

Een vermogen van 2 kW gedurende 1 minuut (d.w.z. 1 / 60 ste van één uur) zal $(2000 / 60) / 12 = 2,7 \text{ Ah}$ aan een 12 V accu onttrekken.

Een vermogen van 2 kW gedurende 10 uur zal $2000 \times 10 / 12 = 1667 \text{ Ah}$ aan een 12 V accu onttrekken!

Ter voorbereiding op de komende hoofdstukken worden in de volgende paragrafen enkele voorbeelden van vermogen- en energieverbruik besproken.

6.3. Koeling

6.3.1. Inleiding

Vaak is de koelkast aan boord een echte nachtmerrie.

Op kleine jachten onttrekt de koelkast soms meer energie aan de accu dan alle overige apparatuur bij elkaar. Op middelgrote jachten zijn het de koelkast en de vriezer die de zwaarste belasting van de accu vormen.

En op grotere jachten is het de airconditioning die tot gevolg heeft dat dag en nacht een dieselgenerator moet draaien.

Om inzicht te krijgen in de vraag waarom dit zo is en om te zien of daar iets aan kan worden gedaan is enige theoretische achtergrondinformatie nodig. Dat is het onderwerp van de volgende paragraaf.

6.3.2. Theorie van de warmtepomp

Bijna alle koelsystemen zijn tegenwoordig van het compressorwarmtepomp type.

De werking is als volgt:

Een compressor, die door een wisselstroom of gelijkstroom motor wordt aangedreven perst een gas samen. Door de drukverhoging wordt het gas warm. Het gas wordt vervolgens afgekoeld tot kamertemperatuur in een warmtewisselaar: de condensor. Op een jacht is de condensor vaak een kleine radiator met een ventilator in het kastje onder de gootsteen, of het is een veel grotere, op natuurlijke wijze geventileerde radiator aan de achterkant van de koelkast (normaal huishoudtype koelkast), of het is een watergekoelde condensor. In de condensor condenseert het gas tot vloeistof en tijdens dat proces komt veel warmte vrij. De vloeistof gaat vervolgens naar de verdamper, de koude plaat in de koelkast of vriezer. Daar wordt de druk verlaagd en de vloeistof verdampt. Voor het verdampingsproces is warmte nodig; deze warmte wordt aan de koelkast of vriezer onttrokken. Vervolgens stroomt het gas zich naar de compressor, enzovoort.

De hoeveelheid energie die nodig is om met een warmtepomp een bepaalde hoeveelheid warmte aan de omgeving te onttrekken kan met de volgende formule worden berekend:

$$\text{CoP} = n_r \times n_c = n_r \times \text{Tlaag} / (\text{Thoog} - \text{Tlaag})$$

waarbij CoP de Prestatiecoëfficiënt is (eng: Coefficient of Performance), Tlaag de temperatuur van de verdamper, uitgedrukt in graden Kelvin ($=^{\circ}\text{C} + 273$), Thoog de temperatuur van de condensor, ook uitgedrukt in graden Kelvin, n_r het machinerendement en n_c het theoretische koeleffect. Het machinerendement n_r is altijd kleiner dan 1 en wordt bepaald door alle verliezen die in de praktijk in het koelsysteem optreden.

Een voorbeeld van een koelkast:

- temperatuur van de koude plaat in de koelkast: -5°C . Maw: Tlaag = $-5 + 273 = 268^{\circ}\text{K}$
- temperatuur van de condensor: 45°C . Maw: Thoog = $45 + 273 = 318^{\circ}\text{K}$
- machinerendement: 25 %

Dan is de CoP:

$$\text{CoP} = 0.25 \times 268 / (318 - 268) = 1.34$$

Dit betekent dat voor elk kWh warmte die aan de koelkast moet worden onttrokken, $1 / 1.34 = 0.75$ kWh elektrische energie nodig is.

6.3.3. De koelkast en de vriezer in de praktijk

De gemiddelde compressormotor van een koelkast verbruikt ongeveer 50 W, of 4.2 A igv een 12 V accu. De compressormotor wordt aan- en uit geschakeld met een thermostaat in de koelkast of vriezer. Indien de compressor continu draait (bedrijfscyclus van 100 %) wordt dagelijks $4.2 \text{ A} \times 24 \text{ h} = 101 \text{ Ah}$ aan een 12 V accu onttrokken. Een nachtmerrie!
Een bedrijfscyclus van 50 % resulteert in 50 Ah dagelijks verbruik en een bedrijfscyclus van 25 % laat zich vertalen naar een dagelijks verbruik van slechts 25 Ah.

Wat we willen is een laag energieverbruik. Hoe kan dit worden bereikt?

1) **De CoP verbeteren**, door het temperatuurverschil tussen de verdamper en de condensator te verkleinen, of door het rendement van de compressor te verhogen.

Als bijvoorbeeld de temperatuur van de condensor door waterkoeling van wordt teruggebracht tot 20°C , in plaats van de 45°C die niet ongebruikelijk is als de verdamper zich in het kastje onder de gootsteen bevindt, dan krijgen we het volgende resultaat:

$$\text{CoP} = 0.25 \times 268 / (293 - 268) = 2.68$$

Dus nu is er slechts $1 / 2.68 = 0.37$ kWh nodig per kWh warmtelekkage. Met andere woorden: er is 50 % minder elektriciteit nodig!

Verdere verbeteringen zouden bereikt kunnen worden door het oppervlak van de verdamper in de koelkast te vergroten, waardoor een temperatuur van een paar graden boven 0 de koelkast afkoelt tot dezelfde temperatuur als de -5°C van ons voorbeeld.

Ook de efficiëntie van de compressor en de motor kan worden verbeterd. Dit is moeilijk, want alle kleine compressoren hebben soortgelijke specificaties.

2) De isolatie verbeteren

Laten we eerst kijken hoeveel energie nodig is om eten of drinken in een koelkast af te koelen.

Hiervoor is het belangrijk te weten dat de soortelijke warmte van water 1.16 Wh per °C is.

De soortelijke warmte van andere dranken en voedsel is ongeveer hetzelfde. Dit betekent dat om 1 liter water of andere dranken, of 1 kg voedsel, 1 °C kouder (of warmer) te maken, 1.16 Wh warmte moet worden onttrokken (of toegevoegd).

Dus als u 5 liter mineraalwater, dat in de zon tot 35 °C is opgewarmd in de koelkast wilt afkoelen tot 10 °C, dan moet er $5 \times (35 - 10) \times 1.16 = 0.145$ kWh warmte door de koelkast aan het mineraalwater worden onttrokken.

Bij een CoP van 1.34 is de hiervoor benodigde elektrische energie $0.145 / 1.34 = 0.108$ kWh, d.w.z. $0.108 / 12 = 9$ Ah uit een 12 V accu. Niet zo veel, 9 Ah, hoewel we van een zeer lage CoP zijn uitgegaan.

Het dagelijks verbruik van een koelkast aan boord van een jacht is meestal veel hoger, namelijk 50 tot 100 Ah, zelfs als de deur de hele dag gesloten blijft. Dit duidt er op dat de warmte die aan de koelkast onttrokken moet worden niet zozeer te maken heeft met het afkoelen van drank of voedsel, maar het gevolg is van warmte die via wanden en de deur van de koelkast naar binnen "lekt".

Conclusie:

Een hoog elektriciteitsverbruik van de koelkast en de vriezer aan boord wordt veroorzaakt door slechte isolatie en/of een slechte CoP en niet door het afkoelen van de dranken en het voedsel.

Daarom is goed isoleren van cruciaal belang om het stroomverbruik te beperken!

Een standaard koelkast zoals in elke witgoed winkel verkrijgbaar is tegenwoordig zeer goed geïsoleerd: Het jaarlijkse energieverbruik van een moderne koelkast is ongeveer 100 kWh, wat zich laat vertalen naar $100 / 365 = 0.27$ kWh per dag, of $0.27 \times 1000 / 24 = 11$ W (!) gemiddeld. Met een 12 V compressor zou het Ah-verbruik $0.27 \times 1000 / 12 = 23$ Ah per dag zijn.

Het energieverbruik van een moderne vriezer is ongeveer twee keer zo hoog en zou 46 Ah per dag van een 12 V accu vragen.

Koelkasten voor jachten worden vaak op maat gemaakt, met isolatie van schuim. De isolatie is meestal bedroevend slecht, een het stroomverbruik daarom heel hoog.

Plaats daarom, indien de ruimte het toelaat, een standaard 230 V koelkast en vriezer, met een omvormer voor de stroomvoorziening.

6.3.4. Airconditioning

Airconditioning vereist enorme hoeveelheden energie. Vooral kleine aircosystemen met een koelcapaciteit van 1 tot 5 kW (3.400 tot 17.000 Btu) hebben vaak een laag rendement. Als er toch al een generator draait is dat geen probleem, behalve misschien wat betreft het brandstofverbruik. Maar zodra de airconditioning ook op de accu moet werken wordt het rendement zeer belangrijk.

Evenals de koelkast en de vriezer, is een airconditioner een warmtepomp met een compressor, een condensor en een verdampers.

Wat vertelt de CoP-formule ons over airconditioning?

Laten we uitgaan van het volgende:

- condensatortemperatuur: 27 °C (koelwater van 25 °C)
- verdampertemperatuur: 15 °C (kamertemperatuur van 25 °C)
- machinerendement: 25 %

Dan is de CoP = $0.25 \times 288 / (300 - 288) = 6$

In de praktijk varieert de CoP van een klein aircosysteem van 2 tot 3!

Dit heeft voornamelijk te maken met een veel hogere condensortemperatuur en een veel lagere verdampertemperatuur dan we hadden aangenomen.

Als we uitgaan van een CoP van 2.5, is er voor 2 kW koelvermogen $2 / 2.5 = 0.8$ kW elektriciteit nodig, die in 10 uur tijd $0.8 \times 1000 \times 10 / 24 = 333$ Ah aan een accu van 24 V onttrekt.

Het kan dus van belang zijn om bij de aanschaf van airconditioning goed naar het stroomverbruik te kijken!

6.4. Elektrische lieren, ankerlier en boegschroef

Zelfs op kleinere schepen verbruiken lieren en de boegschroef zeer veel stroom, maar gedurende korte tijd.

- Een elektrische lier op een schip van 15 m wordt meestal aangedreven door een 1 pk motor (1 pk = 0.736 kW). Bij nominale belasting betekent dit $736 / 12 = 61$ A igv een 12 V systeem. Als de lier 1 minuut wordt gebruikt is het Ah-verbruik $61 / 60 = 1$ Ah (zie par. 6.2). Dus het energieverbruik is ondanks de grote stroom geen probleem
- Een boegschroef verbruikt vaak nog meer stroom. Een 10 pk boegschroef bijvoorbeeld gebruikt 300 A bij 24 V. Eén minuut gebruik leidt tot een ontlading van slechts $300 / 60 = 5$ Ah.

6.5. Wassen en afwassen op de accu?

Een wascyclus op 60 °C met een wasmachine verbruikt 0.9 kWh elektrische energie, of $900 / 24 = 38$ Ah uit een 24 V accu. Bij 40 °C neemt het verbruik af tot 0.6 kWh of $600 / 24 = 25$ Ah.

De voor een vaatwasmachine benodigde energie ligt in dezelfde orde van grootte.

De meeste energie gaat naar het verwarmen van het water (vandaar het grote verschil in energieverbruik tussen een cyclus op 60 °C en één op 40 °C). Toepassen van 'hot fill' (de wasmachine en vaatwasmachine voorzien van water dat al op de juiste temperatuur is in plaats van koud water) zou het energieverbruik met nog eens een paar honderd Wh verminderen!

Het energieverbruik van een wasdroger is wel aanzienlijk. Een wasdroger vraagt 3 kW. Een uur drogen vraagt dus 3 kWh, dwz $3000 / 24 = 125$ Ah uit een 24 V accu. Dit komt doordat voorverwarmde lucht wordt gebruikt om al het resterende vocht te verwijderen. En ik ken geen enkele droger die de lucht verwarmt met een heetwater warmtewisselaar in plaats van een elektrische verwarmers ...

Een complete was/droog cyclus van een kleine was/droger zoals vaak op boten wordt gebruikt vraagt ca. 2.7 kWh.

6.6. Ooit gedacht dat elektrisch koken op de accu haalbaar was?

Ik dacht te weten dat het stroomverbruik veel te hoog zou zijn, totdat ik de berekeningen maakte en in de praktijk toetste. En sinds die tijd heb ik een tweepits inductiekookplaat op mijn trimaran, die werkt op een Phoenix Multi 24/3000/70 en een 24 V 200 Ah serviceaccu.

Het aantrekkelijke van elektrische inductie is dat het niet de kookplek is die wordt verwarmd, maar rechtstreeks de bodem van de pan

Om die reden is elektrische inductie ook 20 % efficiënter dan andere elektrische kookplaten.

Maar nu de theoretische achtergrond, die heel eenvoudig is:

Zoals in paragraaf 6.3.3 al werd gesteld is de soortelijke warmte van water 1.16 Wh per °C. Theoretisch zou het aan de kook brengen van 1 liter water van 20 °C daarom $1.16 \times (100 - 20) = 93$ Wh vergen. In de praktijk vergt het meer dan 100 Wh, afhankelijk van de warmtecapaciteit van de pan en andere verliezen. Deze verliezen kunnen worden gecompenseerd door te beginnen met warm water uit de boiler.

Kortom, 100 Wh per liter is goede vuistregel.

En dan het eigenlijke koken:

Vandaag wordt er spaghetti gegeten met een zelfgemaakte saus, en pudding als dessert. We koken voor 4 personen.

Voor de spaghetti brengen we 4 liter water aan de kook, voegen de spaghetti toe, brengen het geheel opnieuw aan de kook en laten het langzaam 8 minuten doorkoken. Energieverbruik: 400 Wh om het water aan de kook te brengen, 100 Wh om het geheel opnieuw aan de kook te brengen en 400 W gedurende 8 minuten om de spaghetti gaar te laten worden, totaal $400 + 100 + 400 \times 8 / 60 = 550$ Wh.

Voor de saus bakken we de uien (150 Wh), voegen het gehakt toe en bakken het geheel opnieuw (150 Wh), daarna voegen we verse tomaten, kruiden enz. toe en brengen de saus aan de kook (1 liter, dus 100 Wh) en we laten de saus gedurende 20 minuten sudderen (200 W gedurende 20 minuten), totaal

$150 + 150 + 100 + 200 \times 20 / 60 = 470$ Wh.

Voor het dessert verwarmen we 2 liter koude melk direct uit de koelkast (300 Wh), plus 3 minuten sudderen (30 Wh), totaal $300 + 30 = 330$ Wh.

Totale benodigde energie: $550 + 470 + 330 = 1350$ Wh, of $1350 / 24 = 56$ Ah uit een 24 V accu.

Ik heb het bovenstaande ook in de praktijk getest en het resultaat is dat voor de meeste maaltijden van 3 gangen en voor 4 personen inderdaad 1200 tot 1400 Wh nodig is, dwz 50 tot 60 Ah uit een 24 V accu.

6.7. De duikcompressor

Ik houd van duiken. Wat ik niet leuk vind is dat ik na het duiken het anker moet lichten, naar de haven moet varen en mijn flessen naar een duikclub moet sjuwen om ze bij te laten vullen. Waarom geen duikcompressor aan boord installeren?

Een kleine duikcompressor wordt aangedreven door een elektrische motor van ongeveer 3 kW en de startstroom is ongeveer 10 keer het nominale vermogen. Kortom: teveel voor de walstroom aansluiting en ook teveel voor een omvormer of kleine generator.

De oplossing is draaistroommotor met een frequentieregelaar. U moet dan een frequentieregelaar nemen met 1 fase ingang (voor aansluiting op de omvormer of walstroom) en 3 fase uitgang. De frequentieregelaar zorgt ervoor dat de motor geleidelijk op toeren komt zodat de aanloopstroom verwaarloosbaar is.

Het duurt ongeveer 30 minuten om een duikfles van 10 l te vullen, wat betekent dat $(3 \text{ kW} / 24 \text{ V}) \times 0.5 = 62 \text{ Ah}$ aan een 24 V accu wordt onttrokken.

6.8. Hoe om te gaan met de aanloopstroom van wisselstroom-motoren

De oplossing is al gegeven in paragraaf 6.7: gebruik draaistroom motoren en elimineer de aanloopstroom mbv een frequentieregelaar.

6.9. Conclusie

De koelkast, die altijd aan staat, zal, indien niet zorgvuldig geïsoleerd, meer energie verbruiken dan kortstondige verbruikers zoals een wasmachine, vaatwasmachine of zelfs een elektrische kookplaat.

7. GENERATOREN

7.1. Dieselmotor met 50 Hz of 60 Hz wisselstroom generator

Dit is de meest toegepaste oplossing om stroom aan boord te genereren, wanneer stroom opwekken met de dynamo op de hoofd motor niet meet toereikend is.

7.1.1. Veel belasting is beter dan weinig belasting

Om 50 Hz of 60 Hz wisselstroom op te wekken moet de generator op een constant toerental draaien. Voor 50 Hz is dit 3000 toeren per minuut of 1500 toeren per minuut, afhankelijk van het aantal polen van de generator ($3000 \text{ tpm} / 60 = 50 \text{ toeren per seconde} = 50 \text{ Hz}$). Bij geen of weinig belasting blijft de temperatuur van de toch al snel draaiende motor te laag met als gevolg condensatie van vocht (water in de olie), verglazing van de cilinders, etc.

De hele dag de generator laten draaien, meestal niet of nauwelijks belast, is daarom niet aan te bevelen. Ook al niet vanwege het bijbehorende lawaai, stank en brandstof verbruik.

7.1.2. Een hybride systeem

De oplossing is een hybride systeem waarbij de generator alleen draait wanneer veel elektrisch vermogen nodig is, (en dan meteen ook gebruikt wordt om de accu's te laden), terwijl de rest van de tijd een omvormer wordt gebruikt om wisselspanning op te wekken.

Het systeem kan nog verder verbeterd worden door toepassing van een of meer parallel geschakelde Phoenix Multi's of MultiPlus (zie bijvoorbeeld par 10.6.). Dit heeft de volgende voordelen:

- ononderbroken wisselstroom aan boord
- betere belasting, minder ruimte en gewicht en minder lawaai omdat een kleinere generator gekozen kan worden: de MultiPlus werkt parallel met de generator en vangt belastingpieken op met energie uit de accu (zie bijvoorbeeld par. 10.6.5. of "Het onmogelijke mogelijk gemaakt" en vele andere voorbeelden op onze website)

7.1.3. En vergeet de (beperkte) walstroom niet

Een wasmachine, afwasmachine, elektrisch koken, airconditioning, het kan allemaal met een generator van voldoende vermogen. Maar in de haven is de walstroom meestal beperkt tot 16 A of minder ($16 \text{ A} \times 230 \text{ V} = 3,68 \text{ kW}$). Ook dan is de MultiPlus de oplossing om alle elektrische apparatuur toch te kunnen gebruiken.

7.1.4. 3000 rpm versus 1500 rpm

Als u veel gebruik gaat maken van uw generator is een (duurdere en zwaardere) 1500 toeren set de juiste keuze.

De 3000 toeren set is i. h. a. ontworpen voor een beperkt aantal draai uren, en overigens meestal ook niet bestand tegen langdurig gebruik op vollast. Belast een kleine 3000 toeren generator nooit langdurig met meer dan 80 % van de nominale vermogen!

Generator leveranciers gebruiken vaak dezelfde motoren, maar geven daarbij een zeer uiteenlopend elektrisch vermogen aan. Vergelijking van motor type en vermogen kan daarom nuttig zijn.

7.2. Gelijkstroom generatoren

Naast conventionele 230 V generatoren bieden steeds meer leveranciers ook DC-generatoren aan. Met vermogens tot 10 kW kan hiermee een accu laadstroom tot ongeveer 300 A bij 28 V worden gerealiseerd. DC-generatoren zijn kleiner en lichter en hebben een hoger rendement dan AC-generatoren. Bovendien kan het motortoerental op de stroombehoefte worden afgestemd, zodat het rendement hoog blijft, zelfs bij lage belasting.

De DC-generator wordt gebruikt om de accu's te laden. Met omvormers wordt vervolgens wisselstroom gemaakt. Het kiezen van het vermogen van een DC-generator is een kwestie van acceptabele acculaadstroom en het aantal bedrijfsuren per dag.

De enorme laadstroom betekend wel dat de accu voldoende capaciteit moet hebben om die stroom op te nemen. Bijvoorbeeld 1500 Ah bij 300 A laadstroom en laden met C / 5 (zie par. 2.4.6.).

8. KLEINSCHALIGE ENERGIEOPWEKKING: ANDERS DENKEN

8.1. Inleiding

In dit boek wordt onder kleinschalige energieopwekking verstaan energieopwekking van een paar honderd Watt tot 10 kW. Over een periode van 24 uur betekent dit $24 \times 0.2 = 4.8$ kWh tot $24 \times 10 = 240$ kWh elektrische energie.

Dit is de elektrische energie voor één persoon tot en met een paar gezinnen om comfortabel te kunnen leven, in één of een paar woningen, in een camper of aan boord van een schip.

Op het gebied van kleinschalige energie opwekking zijn een aantal technische ontwikkelingen gaande die het de moeite waard maken om de gebruikelijke concepten en ideeën nog eens kritisch te bekijken. Een zeer belangrijk kenmerk van de toepassing waar het hier om gaat is dat het benodigde elektrische vermogen zeer sterk kan fluctueren: soms zal de behoefte bijna nihil zijn en op andere momenten wordt gedurende korte tijd een enorm vermogen gevraagd.

Als een dieselmotor wordt gebruikt om de benodigde elektriciteit te leveren, moet deze berekend zijn voor de maximale behoefte. Gevolg is dat de generator de meeste tijd bijna zonder belasting draait. Dit betekent een hoog brandstofverbruik, om maar niet te spreken van het lawaai, het onderhoud en de vervuiling.

Een probleem dat meer specifiek met boten te maken heeft is walstroom. De walstroomaansluiting is vaak niet toereikend voor het gebruik van een wasmachine, een elektrische kookplaat of airconditioning. En als u de Atlantische Oceaan oversteekt is krijgt u te maken met andere spanningen en met 60 Hz in plaats van 50 Hz. Nieuwe technologieën bieden simpele en goedkope oplossingen voor deze problemen.

8.2. Nieuwe technologie maakt het DC-concept aantrekkelijker

8.2.1. Het DC-concept

In het DC-concept is de accu het hart van het systeem. Op de accu zijn enerzijds de energie bronnen en anderzijds de verbruikers aangesloten. De accu levert extra energie als de vraag groter is dan het aanbod en absorbeert energie als het aanbod groter is dan de vraag.

In het DC-concept vormt de accu een buffer voor elektrische energie die de eventuele onbalans tussen de energieleveranciers en de energieverbruikers compenseert. Maw: de accu doet dienst als "peak shaver".

In feite gebruiken alle kleinere jachten het DC-concept:

Stroom wordt door één of meer dynamo's op de hoofdmotor opgewekt. Soms worden ook nog andere bronnen zoals zonne- en windenergie, of een watergenerator gebruikt. Alle bronnen van elektrische stroom worden gebruikt om de serviceaccu te laden. Alle verbruikers, zoals navigatieapparatuur, verlichting, de omvormer, enz. krijgen stroom vanuit de accu.

De standaard oplossing op grotere jachten is de 230 V dieselmotor, die continu aan staat, of wordt gestart telkens wanneer 230 V huishoudelijke apparatuur gebruikt wordt.

In de volgende paragrafen worden 3 nieuwe ontwikkelingen gepresenteerd die het DC-concept ook voor grotere jachten veel aantrekkelijker maken

8.2.2. DC-generatoren

Naast conventionele 230 V generatoren, bieden steeds meer fabrikanten DC-generatoren aan. DC-generatoren zijn kleiner en lichter en hebben een hoger rendement dan AC-generatoren. Bovendien kan het toerental van de motor op de belasting worden afgestemd, waardoor het rendement verbeterd, en lawaai en slijtage afnemen.

8.2.3. Onbeperkte stroom van de omvormer

Sinusomvormers zijn inmiddels gemeengoed geworden en zijn met steeds grotere vermogens leverbaar.

Nieuw is de mogelijkheid om het vermogen te vergroten door omvormers parallel te schakelen. Victron Energy heeft omvormers en omvormer/acculaders ontwikkeld die zowel in éénfase en in driefasen configuratie parallel geschakeld kunnen worden.

De Multi 12/2500/120 en Multi 24/3000/70 bijvoorbeeld hebben een continu vermogen van respectievelijk 2 kW bij 12 V en 2.5 kW bij 24 V.

Per fase kunnen maximaal 5 apparaten parallel worden aangesloten. Als we een 24 V systeem als voorbeeld nemen, kan het volgende uitgangsvermogen worden bereikt:

Eénfase 6 x Multi i 24/3000	Continu vermogen 6 x 2.5 = 15 kW	P30 18kW	Maximaal vermogen 30 kW
Driefasen 18 x Multi 24/3000	Continu vermogen 18 x 2.5 = 45 kW	P30 54 kW	Maximaal vermogen 90 kW

Met andere woorden: voor alle in dit boek besproken toepassingen kan ruim voldoende vermogen opgewekt worden.

Waar voorheen de installatie van een 230 V dieselgenerator noodzakelijk was, zijn parallelle omvormers nu een alternatief.

8.3. Het AC-concept, verbeterd met *PowerControl* en *PowerAssist*

8.3.1. Het AC-concept

In het AC-concept zijn een of meerdere dieselgeneratoren het hart van het systeem. De generator(en) moet(en) een nominaal vermogen hebben dat gelijk is aan de hoogste vermogensbehoefte die kan voorkomen.

Meestal wordt de generator samen met een acculader, ook gebruikt om één of meer kleine serviceaccu's voor navigatieapparatuur, verlichting, DC-pompen enz. te laden.

Ook de aansluitwaarde van de walstroom moet voldoende zijn voor de hoogste vermogensbehoefte die kan voorkomen.

8.3.2. Het AC-concept met generatorvrije periode

Naarmate het om een kleiner systeem gaat treden de nadelen van het AC-concept steeds meer naar voren. De generator zal gedurende lange periodes werken zonder enige belasting, of moet vaak worden gestart of gestopt. Dit betekent onevenredig veel lawaai, vervuiling, brandstofverbruik, slijtage en onderhoud.

Een manier om deze situatie te verbeteren is de generatorvrije periode, die naast de generator een grote accu, acculaders en omvormers vereist. Als de generator is uitgeschakeld, worden alle verbruikers gevoed met energie die uit de accu. Periodiek, als er toch al veel vermogen nodig is, wordt de generator gestart en dan ook gebruikt om de accu te laden.

Er is inmiddels technologie beschikbaar om het AC-concept nog verder te perfectioneren. Dit is het onderwerp van de volgende paragrafen.

8.3.3. *PowerControl*

De bedoeling van het AC-concept met generatorvrije periode is om de generator zo kort mogelijk te laten draaien. Wanneer de generator draait moet ook de serviceaccu geladen worden. Dit betekent dat een flink deel van het door de generator opgewekte vermogen opgenomen zal worden door de acculaders. Kortom: de generator wordt groter.

Dit is te voorkomen met *PowerControl*.

Met de *PowerControl* functie van de Phoenix Multi wordt de acculaadstroom automatisch verlaagd wanneer de generator tgv toenemende belasting door andere verbruikers overbelast dreigt te raken.. De Multi houdt dus rekening met andere verbruikers en gebruikt voor het laden alleen de stroom die nog 'over' is

Een voorbeeld:

Een schip is uitgerust met een generator en een Phoenix Multi 24/3000/70.

Op de generator is een kleine wasmachine aangesloten, die 2 kW vraagt als de waterverwarmer is ingeschakeld en slechts 150 W als alleen de motor van de wastrommel draait. Gemiddelde belasting: 500 W.

De op te laden accu is 24 V 400 Ah en de maximale laadstroom van de Multi is 70 A. De Multi neemt dan een vermogen op van ca. $70 \text{ A} \times 30 \text{ V} = 2.1 \text{ kW}$.

De maximale te verwachten AC-belasting is 2 kW voor de wasmachine plus 2.1 kW om de accu op te laden

Benodigd nominaal vermogen van de generator: $2 + 2.1 = 4.1 \text{ kW}$. Om te vermijden dat de generator bij volle belasting draait (veel kleine 230 V generatoren houden dat niet lang vol) moet in de praktijk een model van minstens 5 kW worden gekozen.

Een alternatief zou zijn om de accu's niet te laden terwijl de wasmachine draait. Dit zou de bedrijfstijd van de generator verlengen en leiden tot een gemiddelde belasting van slechts 500 W tijdens de wasperiode. Benodigde generator: minimaal 2.1 kW, in de praktijk 3 kW.

De *PowerControl* functie van de Multi maakt het mogelijk om met een 3 kW generator toch de accu's te laden terwijl tegelijkertijd de wasmachine draait. Met het Phoenix Multi Control bedieningspaneel kan de maximale generatorstroom ingesteld worden. De stroom kan bijvoorbeeld ingesteld worden op 10 A, wat het uitgangsvermogen van de generator zou beperken tot een veilige $10 \text{ A} \times 230 \text{ V} = 2.3 \text{ kW}$. Dit is 77 % van het nominale vermogen van 3 kW. Na het starten van de generator zou de Multi automatisch van omvormer bedrijf overschakelen op het laden van de accu met 70 A.

Wanneer de wasmachine wordt aangezet zal de Multi 70 A laadstroom blijven leveren zolang alleen de motor van de wasmachine draait (80 % van de tijd). De belasting van de generator is dan $150 \text{ W} + 2.1 \text{ kW} = 2.25 \text{ kW}$, net onder de ingestelde limiet van 2.3 kW.

Zodra de waterverwarmer inschakelt (20 % van de tijd) neemt het verbruik van de wasmachine toe tot 2 kW, zodat slechts $2.3 \text{ kW} - 2 \text{ kW} = 300 \text{ W}$ overblijft voor het laden van de accu. Met *PowerControl* zal de Multi dan **automatisch** de laadstroom reduceren tot ca. $300 \text{ W} / 30 \text{ V} = 10 \text{ A}$.

Uit het voorbeeld blijkt dat dankzij *PowerControl* de generator veel efficiënter wordt gebruikt.

Gedurende 80 % van de tijd dat de wasmachine in bedrijf was, konden ook de accu's geladen worden, met de maximaal beschikbare laadstroom.

Het bovenstaande voorbeeld is ook van toepassing op de walaansluiting.

Vaak is echter de aansluitwaarde te laag voor gebruik van de huishoudelijke apparatuur aan boord, zelfs als de accu's in het geheel niet geladen worden. Denk bijvoorbeeld aan de wasmachine in het bovenstaande voorbeeld, waarvoor een walaansluiting van minstens $2 \text{ kW} / 230 \text{ V} = 9 \text{ A}$ nodig is. Voor een elektrische kookplaat van 7.5 kW zou zelfs een walaansluiting van bijna 35 A nodig zijn!

Om dit probleem op te lossen is *PowerAssist* ontwikkeld.

8.4. Nieuw: *PowerAssist*, het AC-concept met accu-ondersteuning

8.4.1. *PowerAssist*

PowerAssist is een functie van de de Phoenix MultiPlus.

Telkens wanneer er problemen ontstaan omdat de walstroom of de generator te zwak is om alle aangesloten apparatuur van stroom te voorzien biedt de Phoenix MultiPlus een complete oplossing. De MultiPlus verdeelt en regelt volledig automatisch de stroomtoevoer. Een tekort aan stroom van de walaansluiting of van de generator wordt direct aangevuld door stroom uit de accu om te zetten en te gebruiken. Ook omgekeerd zal bij lage energiebehoefte de MultiPlus automatisch overschakelen op het bijladen van de accu. Het enige dat men moet doen is de knop op het Multi Control Panel instellen op het maximum ampèrage van de walstroom of de generator. De MultiPlus doet dan de rest.

Door meerdere eenheden parallel te schakelen kan deze "bijlever" functie aan praktisch elk gewenst vermogen aangepast worden.

Twee voorbeelden:

Voorbeeld 1: walstroom aansluiting 4 A

Laten we aannemen dat de magnetron, van 1500 VA, het apparaat is met de hoogste aansluitwaarde. De magnetron zal maximaal $1500 \text{ VA} / 230 \text{ V} = 6.5 \text{ A}$ walstroom vragen. Als uw koffiezetapparaat (4 A) het rijke aroma van versgezette koffie begint te verspreiden en de magnetron aangezet wordt, neemt uw stroomverbruik toe tot $4 + 6.5 = 10.5 \text{ A}$. Resultaat: daar gaat de walzekering weer!

De oplossing is een MultiPlus, bijvoorbeeld een Phoenix MultiPlus 12/2000/120 met een Phoenix Multi Control paneel.

Met de draaiknop op het paneel zet u de walstroom op 4 A.

Indien u nu gedurende 5 minuten de magnetron aanzet zal de MultiPlus $6.5 - 4 = 2.5 \text{ A}$ "bijleveren". De hiervoor benodigde energie komt uit de accu. De ontladstroom van de accu zal ca.

$2.5 \text{ A} \times 230 \text{ V} / 12 \text{ V} = 50 \text{ A}$ bedragen. De totale ontlading voor 5 minuten magnetron gebruik is slechts $50 \text{ A} \times 5 / 60 = 4 \text{ Ah}$! Als ook nog het koffiezetapparaat aan staat zal het stroomverbruik uit de accu toenemen met $4 \text{ A} \times 230 \text{ V} / 12 \text{ V} = 80 \text{ A}$, totaal dus $50 + 80 = 130 \text{ A}$. De totale ontlading is na

5 minuten $13 \text{ A} \times 5 / 60 = 11 \text{ Ah}$. Nadat u klaar bent met de magnetron en met koffiezetten zal de MultiPlus de beschikbare walstroom gaan gebruiken om de accu's weer bij te laden. Bij 4 A walstroom wordt de laadstroom ca. $4 \text{ A} \times 230 \text{ V} / 12 \text{ V} = 77 \text{ A}$ (in de praktijk wat minder, ca. 50 A, t.g.v. verliezen in het systeem, en omdat de accuspanning al gauw hoger zal zijn dan 12 V). Na een kwartiertje is de accu weer bijna geheel geladen.

Voorbeeld 2: elektrisch koken met een walstroom aansluiting van 16 A en 3x parallel geschakelde MultiPlus 24/2500/70

Stel u heeft een 12 kVA diesgenerator aan boord en een inductie kookplaat met 4 kookplekken, maximaal afgenomen vermogen 7.5 kW, dwz $7500 \text{ W} / 230 \text{ V} = 33 \text{ A}$ uit een 1 fase 230 V voeding! Voor de generator geen probleem, maar zelfs met een 16 A walaansluiting valt er niet veel te beginnen! Met het MultiPlus systeem kunt u uw kookplaat ook op de walaansluiting voluit gebruiken. Wanneer alle platen vol aan staan moet het MultiPlus systeem $33 - 16 = 17 \text{ A}$ bijleveren. Dit betekent een ontladstroom uit de accu van $17 \text{ A} \times 230 \text{ V} / 24 \text{ V} = 165 \text{ A}$. Langer dan 5 minuten zult u alle kookplekken niet vol aan hebben staan. Gedurende die periode wordt slechts $165 \text{ A} \times 5 / 60 = 14 \text{ Ah}$ aan de accu onttrokken! Wanneer het water kookt en de braadpan heet is zet u de platen zachter en de praktijk wijst uit dat het stroomverbruik dan minder dan 16 A zal zijn. De accu wordt dan niet of nauwelijks meer ontladen. Kortom: zelfs met nog minder walstroom zal elektrisch koken de accu niet noemenswaardig ontladen.

De mogelijkheden van het MultiPlus systeem worden nog beter benut indien het systeem m.b.v. de PowerMan ook op de generator aangesloten wordt. Het MultiPlus systeem zal dan de vervorming van de uitgangsspanning van de generator verminderen (inductie kookplaten zijn erg gevoelig en weigeren dienst als de spanning teveel vervormd is) en u beschikt over een accu laadstroom van $3 \times 70 = 210 \text{ A}$.

Bovendien:

- kunt u met een kleinere generator volstaan: het MultiPlus systeem kan immers bijleveren;
- hoeft u voor een kop thee of een gebakken ei de generator niet te starten: dit doet u met het MultiPlus systeem en het verbruik uit de accu zal slechts 10 tot 20 Ah bedragen;
- kunt u een signaal uit het MultiPlus systeem gebruiken om in geval van langdurig gebruik van veel vermogen automatisch de generator te starten.

Door tijdelijk extra vermogen vanuit de accu toe te voegen lost de MultiPlus met *PowerAssist* het probleem van onvoldoende wal- of generatorstroom op.

8.4.2. Nog meer voordelen van Combi's of Multi's

Ononderbroken wisselspanning

- Wisselspanning is altijd beschikbaar, via de Multi's of van de generator of walstroom.
- Een digitale klok of de instellingen van een videorecorder hoeven niet opnieuw te worden ingesteld telkens wanneer de generator wordt stopgezet.

Onmiddellijke beschikbaarheid

- Indien er voldoende vermogen met (parallel geschakelde) Multi's is geïnstalleerd, kan alle - apparatuur aan boord worden gebruikt zonder dat eerst een generator gestart moet worden. De generator kan op later tijdstip automatisch gestart worden door een signaal van een accu monitor of door het in de Multi ingebouwde start relais.

8.4.3. Walstroom

We hebben gezien dat het walstroom probleem opgelost kan worden met de MultiPlus en *PowerAssist*. In de praktijk is het, ten gevolge van dynamische response beperkingen, raadzaam om per Multi over minstens 2 A walstroom te beschikken. Wanneer bijvoorbeeld 3 Multi's parallel geschakeld worden zou de aansluitwaarde dus minstens $2 \times 3 = 6 \text{ A}$ moeten zijn.

Wanneer meer dan 2 Multi's zijn geïnstalleerd en de walstroom aansluiting bijvoorbeeld slechts 4 A is, **is het raadzaam om het DC-concept voor walstroom te gebruiken**. Met andere woorden: gebruik een acculader om walstroom in DC om te zetten en zet DC om in AC met de omvormers, Combi's of Multi's die zich toch al aan boord bevinden. De serviceaccu zal extra energie leveren als er veel vermogen nodig is en zal door de acculader worden opgeladen tijdens periodes waarin de vermogensbehoefte laag is. Met een walaansluiting van 4 A moet de laadstroom van een 24 V acculader begrensd worden op maximaal $230 \text{ V} \times 4 \text{ A} / 30 \text{ V} = 30 \text{ A}$. Een 12 V accu kan dan met maximaal 60 A geladen worden

8.5. Een andere manier van denken

8.5.1. Dagelijkse energiebehoefte

Zowel voor het DC-concept als het accu-ondersteunde AC-concept is de eerste vraag die moet worden gesteld niet: "tot hoe hoog kan de stroom- of de vermogensbehoefte oplopen?" waarna vervolgens de generator op die basis worden gekozen. De vraag zou in plaats daarvan moeten zijn: "wat is de dagelijkse elektrische energiebehoefte?"

Bij toepassing van het DC-concept of het accu-ondersteunde AC-concept wordt de aansluitwaarde van de generator of de walaansluiting namelijk niet meer bepaald door het maximale verbruik dat voor kan komen, maar door het gemiddelde verbruik.

Walstroom is iha 24 uur per dag beschikbaar. Dan gaat de berekening als volgt:

gemiddeld vermogen (Watt) = dagelijkse energiebehoefte (kWh) x 1000 / 24 uur, en

minimale aansluitwaarde = gemiddeld vermogen / 230 V

Bijvoorbeeld

- energie behoefte per etmaal: 48 kWh (zie hoofdstuk 11)
- gemiddeld vermogen: $48 \text{ kWh} \times 1000 / 24 \text{ uur} = 2000 \text{ W}$
- walaansluiting benodigd van minstens $2000 / 230 \text{ V} = 8 \text{ A}$

In de praktijk is er wat reserve nodig en moeten mogelijk ook nog accu's geladen worden, zodat een 10 A of 16 A aansluiting nodig zal zijn.

Dynamo's op de hoofdmotor of een dieselgenerator draaien meestal niet 24 uur per dag. De dagelijks benodigde bedrijfstijd om de vereiste energie te produceren wordt met de volgende formule berekend:

bedrijfstijd (uren) = dagelijkse energiebehoefte (kWh) / vermogen van de elektriciteitsbron(nen) (kW)

Of, als de bedrijfstijd tot een bepaald aantal uren moet worden beperkt, dan is de formule:

vermogen van de elektriciteitsbron(nen) = dagelijkse energiebehoefte / bedrijfstijd

Enkele voorbeelden:

8.5.1.1 Dagelijks benodigde energie: 4 kWh (zie hoofdstuk 9)

Bron: dynamo op de hoofdmotor die 100 A aan een 12 V accu levert, d.w.z. $100 \text{ A} \times 12 \text{ V} = 1.2 \text{ kW}$

Dagelijks benodigde bedrijfstijd: $4 \text{ kWh} / 1.2 \text{ kW} = 3.3 \text{ h}$

(In de praktijk zal de bedrijfstijd wat langer zijn door verliezen in het systeem en mogelijk een lage stroomabsorptie capaciteit van de accu aan het einde van de laadcyclus, maar voor een eerste schatting is de berekening goed genoeg)

8.5.1.2 Dagelijkse energiebehoefte: 14 kWh (zie hoofdstuk 10)

Bron: dieselgenerator, maar deze mag niet meer dan 4 uur per dag draaien

Minimaal nominaal vermogen van de generator: $14 \text{ kWh} / 4 \text{ h} = 3.5 \text{ kW}$

8.5.2. Accucapaciteit

Als het opwekken van elektrische energie beperkt is tot een paar uur per dag (dynamo op de hoofdmotor of generator met generatorvrije periode), wordt de capaciteit van de accu bepaald door de hoeveelheid energie die de accu moet leveren tijdens de periodes waarin de hoofdmotor of de generator uitgeschakeld zijn: de generatorvrije periode.

In de praktijk zal, door de korte laadperiodes, de accu tot niet meer dan 80 % worden geladen. De accu mag ook niet te vaak verder dan tot 30 % van de nominale capaciteit worden ontladen. Dit betekent een bruikbare accucapaciteit van maximaal $80 \% - 30 \% = 50 \%$.

We moeten ook rekening houden met een veiligheidsmarge: als een accu is ontladen tot 70 % is er geen marge over als er iets onverwachts gebeurt. Er is geen algemene regel voor de grootte van de marge, maar laten we 10 % nemen. Zo komen we op een ontlading tot 60 % en een bruikbare capaciteit van 40 %.

Dan moeten we nog rekening houden met 20 % capaciteitsverlies wanneer de accu ouder wordt. De bruikbare capaciteit wordt dan $40 \% \times (100 - 20) = 32 \%$.

Tenslotte, als we de accu sneller ontladen, of langzamer, dan nominaal (de nominale ontladingsduur is in het algemeen 20 uur, zie par. 2.5.3) moet er nog een correctiefactor worden toegepast. In de meeste gevallen wordt de serviceaccu gedurende 8 tot 12 uur ontladen, en 32 % ontlading in 8 uur is gelijk aan $32 \times 24 / 8 = 96$ % ontlading in 20 uur. Zeer dichtbij de 100 %, dus is er geen extra correctie nodig voor accu's met een nominale ontladingsduur van 20 uur.
(Ik kan mij de opluchting van de lezer voorstellen: de bruikbare capaciteit zou tot bijna nul zijn gedaald als er nog meer correcties moesten worden toegepast!).

De volgende stap is het berekenen van de hoeveelheid stroom die wordt verbruikt en wanneer. Dit is het onderwerp van de volgende hoofdstukken.

Conclusie:

Het exact berekenen van de benodigde accucapaciteit is niet eenvoudig. Het zou handiger zijn om met een vuistregel te werken.

De op de praktijk gebaseerde vuistregel is dat igv van 2 laadcycli per etmaal, de accucapaciteit tenminste twee maal het elektriciteitsverbruik per etmaal, uitgedrukt in Ah moet zijn.

Als het dagelijkse verbruik bijvoorbeeld 128 Ah is (zie par. 9.3), dan moet de accucapaciteit minstens 256 Ah zijn.

Aannemende dat de accu met een constante stroom ontladen wordt, dan zou onze accu van 256 Ah over een periode van 12 uur een ontlading ondergaan van $128 / 2 = 64$ Ah.

De aan de theorie ontleende vuistregel is dat de bruikbare accucapaciteit 32 % van de nominale capaciteit is. Uitgaande van een maximale periode van 12 uur tussen de laadcycli en een verbruik van $128 / 2 = 64$ Ah tijdens die periode, dan zou 32 % bruikbare capaciteit in dit voorbeeld betekenen dat we een accu nodig hebben van $64 \text{ Ah} / 0.32 = 200$ Ah.

Het positieve verschil tussen de praktijk en de theorie van $265 - 200 = 65$ Ah kan worden gezien als compensatie voor het feit dat de ontlading in de praktijk niet constant is, maar afhankelijk is van welke verbruikers ingeschakeld zijn en wanneer. De duur van de oplaadperiodes kan ook variëren.

Met andere woorden: de theorie leidt tot hetzelfde resultaat als de vuistregel.

We hebben nu twee eenvoudige vuistregels om de benodigde capaciteit van de serviceaccu te berekenen:

1) De capaciteit van de serviceaccu moet tenminste drie keer de verwachte ontlading tijdens de generatorvrije periode zijn. ($100 \% / 32 \% = 3.1$)

2) Als de serviceaccu twee keer per etmaal wordt geladen, moet de capaciteit tenminste twee keer het dagelijkse Ah-verbruik zijn.

Twee voorbeelden:

1) Maximum hoeveelheid energie die aan de accu wordt onttrokken tijdens de generatorvrije periode: 4 kWh

Minimum capaciteit van de accu (12 V-systeem): $4 \text{ kWh} \times 3 / 12 \text{ V} = 1000$ Ah

Minimum capaciteit van de accu (24 V-systeem): $4 \text{ kWh} \times 3 / 24 \text{ V} = 500$ Ah

2) Dagelijkse hoeveelheid energie die aan de accu wordt onttrokken: 4 kWh, d.w.z. $4000 / 12 = 333$ Ah voor een 12 V-systeem

Aantal laadcycli per dag: 2

Minimum omvang van de accu (12 V-systeem): $333 \times 2 = 666$ Ah

8.5.3. Walstroom

Als de generator aan boord zodanig is gekozen dat de maximale verwachte vermogensbehoefte kan worden geleverd zal, vanzelfsprekend, de walstroomaansluiting ook in staat moeten zijn om het maximale verbruik aan boord te leveren.

Laten we aannemen dat de magnetron, van 1500 W, het apparaat is dat de meeste elektriciteit verbruikt. De magnetron zal $1500 / 230 = 6.5$ A van een 230 V walaansluiting vragen. Dit is al meer dan de vaak voorkomende 4 A of 6 A aansluitwaarde. Als tegelijkertijd de elektrische boiler inschakelt (4 tot 5 A) en uw koffiezetapparaat (4 A) begint net het heerlijke aroma van versgezette koffie te verspreiden, neemt uw stroomverbruik toe tot $6.5 + 4 + 5 = 15.5$ A. Met andere woorden: u bent zelfs bijna bezig een walaansluiting van 16 A te laten struikelen!

Om maar niet te spreken van een wasmachine (9 tot 13 A), een vaatwasmachine (ook 9 tot 13 A) of een elektrische kookplaat (16 tot 35 A).

Het resultaat is dat de generator moet worden gestart, zelfs als de boot in de haven is afgemeerd.

Niet echt de manier om vrienden te maken op de naastgelegen schepen. En bovendien is het gebruik van een generator in de haven steeds vaker gewoon verboden.

De oplossing is een andere manier van denken en het DC-concept voor walstroom toe te passen, of het AC-concept met *PowerAssist*. Ook hier is de vraag niet: "*tot hoe hoog kan de stroom- of de vermogensbehoefte oplopen?*" maar in plaats daarvan: "*wat is de dagelijkse elektrische energiebehoefte?*"

De magnetron bijvoorbeeld gebruikt 6.5 A, maar gedurende slechts 5 minuten. Als deze stroom over 50 minuten wordt gemiddeld, dan zou de 6.5 A verminderen tot een tiende (0.65 A), maar gedurende een tien keer zo lange periode: 50 minuten in plaats van 5 minuten.

Dit is precies wat het DC-concept doet: de hoofdaccu gebruiken om de pieken in het stroomverbruik evenredig te verdelen (eng: peakshaving).

Het in hoofdstuk 9 beschreven voorbeeld van het volledig uitgeruste jacht (par. 9.5), waarbij de magnetron inderdaad het apparaat is dat de meeste elektriciteit gebruikt, laat zien dat het dagelijkse energieverbruik, wanneer het schip voor anker ligt 3 kWh is, wat zich laat vertalen naar een gemiddeld verbruik van $3000 / 24 = 125$ W, dwz een gemiddelde ontladstroom van 11 A uit de 12 V serviceaccu. De walstroom zou bij een gemiddeld verbruik van 125 W slechts $125 / 230 = 0.6$ A zijn! In de praktijk zal de walstroom wat hoger zijn, vanwege verliezen en enige reserve om de accu te laden, maar zelfs 1 A is nog steeds bijna niets.

Het voorbeeld uit hoofdstuk 10 laat zien dat met meer elektrische apparatuur aan boord, de benodigde walaansluiting dankzij het DC-concept kan worden teruggebracht van 8 kW (driefasen 16 A walaansluiting nodig) tot slechts 1.3 kW (6 A 230 V walaansluiting).

Tot tien keer minder walstroom nodig.

Zoals de voorbeelden laten zien, leidt het DC-concept echt tot een adembenemende reductie van het benodigde vermogen van de walaansluiting.

De gemiddelde stroombehoefte is in het algemeen minder dan een $\frac{1}{4}$ of zelfs, afhankelijk van het stroomverbruikprofiel aan boord, minder dan $\frac{1}{10}$ van de maximale stroombehoefte. Daarom zal de acculader die nodig is om op de walstroom aan te sluiten ook vrij klein zijn, en een kleine investering in vergelijking met de totale kosten van de elektrische infrastructuur aan boord.

Bovendien is een walstroomaansluiting met een laag vermogen veel gemakkelijker te vinden in een overvolle jachthaven dan een 16 A of een driefasenaansluiting!

Maar de reductie vande aansluitwaarde van de walstroom is niet het enige voordeel van het DC-concept:

Schone, stabiele en storingsvrije wisselspanning

Wat er ook mis gaat met de walstroom, de accu en de omvormers zijn de bron van de wisselspanning aan boord.

Ingebouwde frequentieomvormer

Moderne acculaders werken zowel op 50 Hz als op 60 Hz. Sommige acculaders werken ook met een universele ingangsspanning van 90 V tot 260 V. **Bij toepassing van het DC-concept met universele acculaders kan overal ter wereld walstroom gebruikt worden. Een dure en zware frequentieomvormer is overbodig.**

9. ENERGIE BEHOEFTE TOT 4 kWh PER ETMAAL (gemiddeld 170 Watt)

9.1. Inleiding

Nu is het tijd om aan boord te gaan, zodat we kunnen zien hoe dit alles in de praktijk werkt. Natuurlijk zijn alle boten verschillend uitgerust, afhankelijk van het doel, het budget en de eigenaar. Sommige boten zijn zodanig uitgerust dat men er de Atlantische Oceaan mee kan oversteken of de wereld rond kan zeilen. Anderen zijn bedoeld om op rivieren en kanalen te varen. En weer anderen worden gebruikt om een dagje te gaan vissen. Sommige boten worden door de eigenaar gevaren en onderhouden, terwijl anderen deel uitmaken van een huurvloot. En dan zijn er ook nog soortgelijke elektrische installaties in bijvoorbeeld campers of woningen zonder netaansluiting.

Ik heb ervoor gekozen om hier jachten als voorbeeld te nemen, want daar heb ik zelf ervaring mee. Het is niet moeilijk om de redenering van dit hoofdstuk en de volgende hoofdstukken op andere applicaties toe te passen. Het eerste schip waar we aan boord gaan is vrij eenvoudig wat betreft de elektrische installatie en het elektriciteitsverbruik is zo laag mogelijk gehouden. Het zou typisch een motorboot kunnen zijn van maximaal 9 meter of een zeilschip van maximaal 12 meter. Het schip heeft een elektriciteitssysteem van 12 V en we zullen om te beginnen alle elektrische apparatuur en het bijbehorende elektriciteitsverbruik bespreken.

9.2. Uitrusting en elektriciteitsverbruik

- 9.2.1. **Navigatie-instrumenten** (windset, log, dieptesonde, enz): minder dan 0.2 A
- 9.2.2. **GPS**: ongeveer 0.2 A
- 9.2.3. **Marifoon**
Het standby-verbruik is laag (ca. 0.1 A). Zenden neemt wel veel stroom (ca. 5 A), maar is kortstondig, waardoor het dagelijks verbruik in Ah vrij laag blijft.
- 9.2.4. **Driekleuren toplicht of ankerlicht**: 25 W
(25 W / 12 V = 2.1 A)
- 9.2.5. **Stuurautomaat**
De stuurautomaat kan bij langdurig gebruik één van de grootste verbruikers zijn. Het stroomverbruik van de motor is al snel 5 A. Bij een duty cycle van 30 % is het gemiddelde verbruik $5 \times 0.30 = 1.5$ A. Het is belangrijk in gedachten te houden dat dit slechts een ruwe benadering is. Het stroomverbruik van de stuurautomaat hangt in de praktijk af van het schip, de zeegang, enz.
- 9.2.6. **Radio**
Vooral op langere reizen wordt vaak de (auto)radio aangezet. Het stroomverbruik daarvan is ongeveer 1 A.
- 9.2.7. **Kajuitverlichting**
Vandaag de dag bestaat de verlichting uit halogeen lampen (10 W tot 20 W per lampje) en tl-buizen (ca. 8 W). Gloeilampen zijn niet aan te bevelen, omdat ze tot 5 keer zoveel stroom verbruiken voor dezelfde hoeveelheid licht. Uitgaande van 10 lichtpunten en zuinig gebruik, schatten we het verbruik op 10 Ah per etmaal.
- 9.2.8. **Koelkast**
De koeling werd in par. 6.3 al besproken.
In dit voorbeeld zullen we ervan uitgaan dat we een koelkast aan boord hebben met een compressor van 50 W, en een duty cycle van 50 %. Naar mijn ervaring is dit een gemiddelde koelkast wat betreft het energieverbruik, als men in een gematigd klimaat vaart.

9.3. Verbruik tijdens een etmaal zeilen

Ons uitgangspunt is een periode van 24 uur zeilen (op een motorjacht is tijdens het varen het stroomverbruik niet belangrijk, omdat de dynamo op de hoofdmotor het verbruik gemakkelijk kan bijhouden). We zullen nu de benodigde accucapaciteit bepalen voor het voeden van alle verbruikers.

In de volgende tabel zijn de verbruikers verdeeld in continue (C), langdurige (L) en kortstondige (K) verbruikers.

Verbruikers	Verbruik		Duur per etmaal	% aan	Verbruik per etmaal	
	Watt	Amp			Uren	%
C Navigatie-instrumenten		0.2	24			5
C GPS		0.2	24			5
C Marifoon in standby		0.1	24			2
K Zenden		5	0.2			1
C Koelkast, luchtgekoelde warmtewisselaar	50	4.2	24	50		50
L Driekleuren toplicht of ankerlicht	25	2.1	8			17
L Stuurautomaat		5	20	30		30
L Radio		1	3			3
K Verlichting	200		0.6			10
K Diversen						5
Totaal verbruik per etmaal					1.5	128
Gemiddeld verbruik per etmaal	64	5.3				
Minimum accucapaciteit, uitgaande van 2 laadcycli per dag (zie par. 8.4.2)						256

Het is opvallend dat de koelkast verreweg de grootste verbruiker is. Het stroomverbruik van de koelkast zou kunnen worden gehalveerd door een duurdere watergekoelde warmtewisselaar te gebruiken in plaats van een luchtgekoelde warmtewisselaar en door de isolatie te verbeteren. Het totale verbruik per etmaal zou dan tot 103 Ah worden teruggebracht.

9.4. Voor anker of afgemeerd zonder 230 V aansluiting

Ons uitgangspunt is opnieuw 1 etmaal, waarbij het onderstaande nu geldt voor motor- en voor zeiljachten.

Verbruikers	Verbruik		Duur per etmaal	% aan	Verbruik per etmaal	
	Watt	Amp			Uren	%
C Koelkast, luchtgekoelde warmtewisselaar	50	4.2	24	50		50
L Toplicht	25		8		0.2	17
L Radio		1	3			3
K Verlichting	200		0.6			10
K Diversen						5
Totaal verbruik per etmaal					1.0	85
Gemiddeld verbruik per etmaal	42	3.5				
Minimum accucapaciteit, uitgaande van 2 laadcycli per dag (zie par. 8.4.2)						170

9.5. Extra "luxe"

Zelfs de relatief kleine schepen die wij hier bespreken hebben vaak enige extra veiligheid en comfort aan boord. Hieronder worden enkele optionele extra's genoemd. Voor enkele daarvan is een omvormer nodig. Omdat het rendement van omvormers tegenwoordig hoger is dan 90 %, wordt het verlies in de omvormer bij de berekening van het energieverbruik verwaarloosd.

9.5.1. Elektronisch navigatiesysteem

Dit is tegenwoordig zelfs op kleinere jachten zeer gebruikelijk.

9.5.2. Kortegolf zender (SSB)

Zeer nuttig op oceaandreizen.

Radar

Verhoogt de veiligheid wanneer men 's nachts of in slecht weer vaart.

9.5.3. Magnetron

Een magnetron verbruikt gedurende korte tijd veel energie (tot 1.5 kW). Als de magnetron 12 minuten per dag wordt gebruikt is het verbruik $1500 \times 0.2 / 12 = 25$ Ah.

9.5.4. Verwarming

Het stroomverbruik van verwarming op diesel is beperkt tot de dieselpomp en de ventilatoren. Het verbruik is ca. 5 A.

9.5.5. Airconditioning

Pas bij de aanschaf van airconditioning op het stroomverbruik, i. h. b. als de airco op energie uit de accu moet werken!.

9.5.6. Watermaker

Er zijn tegenwoordig zeer efficiënte watermakers verkrijgbaar (oa Spectra) die werken op 12 V. Het stroomverbruik is slechts 10 tot 20 A voor 30 tot 60 liter drinkwater per uur. Hierdoor is een watermaker (en dus ook een dekdouche met zoet water!) een reële optie geworden voor kleine jachten waarmee lange tochten over zee gemaakt worden.

In de volgende tabel wordt het stroomverbruik van de bovenstaande extra luxe in kaart gebracht. Het elektriciteitsverbruik is gebaseerd op een bemanning van 2 of 3.

Verbruikers	Verbruik		Duur per etmaal	Verbruik per etmaal	
	Watt	Amp		kWh	Ah (12 V)
C Elektronisch navigatiesysteem		2	24		48
C Kortegolf zender		12	0.1		7
L Radar		3	8		24
K Magnetron	1500		0.2	0.3	25
L Verwarming		5	$6 \times 0.5 = 3$		15
L Airconditioning, koelcapaciteit 1 kW	350		$6 \times 0.5 = 3$	0.5	(45)
L Watermaker, 150 liter per dag		10	5		50
Verbruik per etmaal				2.0	169
Gemiddeld verbruik per etmaal	85	7			

Met alle extra luxe aan boord (behalve de airco) bedraagt de totale energiebehoefte per dag:

- varend : $1.5 + 2.0 = 3.5$ kWh, of $128 + 169 = 297$ Ah
- voor anker: $1.0 + 2.0 = 3.0$ kWh, of $85 + 169 = 254$ Ah

Dit laat zich vertalen naar de volgende minimum accucapaciteit en gemiddelde ontladstroom:

- varend : $297 \times 2 =$ ca. 600 Ah en 12.3 A ontladstroom
- voor anker: $254 \times 2 =$ ca. 500 Ah en 10.5 A ontladstroom

We gaan nu kijken hoe we de benodigde energie kunnen opwekken voor het "basisjacht" (1.0 tot 1.5 kWh) en voor het "volledig uitgeruste" jacht (3.0 tot 3.5 kWh).

9.6. De accu opladen

9.6.1. Met de dynamo op de hoofdmotor.

De hoofdmotor is meestal voorzien van een dynamo van 14 V / 60 A. Dit betekent dat de dynamo bij 6000 tpm 60 A levert. Stelt u zich voor dat de diameterverhouding tussen de motorpoelie en de poelie op de dynamo 2:1 is, dan zou de motor 3000 toeren moeten maken om 60 A laadstroom te bereiken. In de praktijk doet niemand dit, omdat het teveel lawaai maakt. Om stroom op te wekken draait de motor meestal op 1500 tot 2000 tpm. De laadstroom is dan 40 % tot 80 % van de nominale waarde, d.w.z. 30 tot 50 A.

Dit betekent dat de motor 2 tot 3 uur per dag moet draaien om de hoofdaccu te laden voor het "basisjacht" en 7 tot 8 uur per dag voor het volledig uitgeruste jacht.

Dat is geen aantrekkelijke situatie, tenzij:

- u van plan bent elke dag een grote afstand op de motor te varen;
- het schip voornamelijk voor dagtochtjes wordt gebruikt.

Hoe is langdurig "stroom-draaien" te voorkomen?

9.6.2. Verhogen van de accucapaciteit zodat u meerdere dagen kunt zeilen of voor anker liggen. Dit is een eenvoudige en goedkope oplossing die echter alleen zin heeft als u altijd verwacht binnen een paar dagen een langere periode op de motor te varen, of gebruik te kunnen maken van walstroom.

9.6.3. Een tweede of grotere dynamo
Zie hoofdstuk 4 en 5 voor de te nemen maatregelen. Door het verhogen van de laadstroom tot 80 A zou stroom-draaien beperkt kunnen worden tot 1 of 2 uur per dag. Maar houd wel in gedachten dat de laadstroom die een accu zonder schade zal accepteren beperkt is; zie par. 2.4.6.

Twee opmerkingen over het rendement:

1) Om rekening te houden met het verlies in de accu (energierendement in gedeeltelijk geladen toestand: ca. 89 %, zie par. 3.3.), in de bedrading, in diode isolatoren of gelijkrichters en, bij sommige verbruikers, een omvormer, wordt bij alle berekeningen voor het laden van de accu uitgegaan van een laadspanning van 15 V, respectievelijk 30 V. Met andere woorden: er wordt uitgegaan van een rendement van $\eta = 12 \text{ V} / 15 \text{ V} = 80 \%$.

Een voorbeeld:

-het ontladen van een accu met 150 Ah bij 12 V betekent een energieverbruik van $150 \text{ Ah} \times 12 \text{ V} = 1.8 \text{ kWh}$

-150 Ah opladen bij "15 V" betekent een energietoevoer van $150 \text{ Ah} \times 15 \text{ V} = 2.25 \text{ kWh}$

-het verschil, $2.25 - 1.8 = 0.45 \text{ kWh}$, gaat tijdens het proces verloren.

2) Het rendement van een dynamo + V-snaar is ca. 50 %. En dan draait de motor met een belasting van slechts 10 tot 20 %, wat een brandstofrendement tot gevolg heeft van ca. 10 %...

Tezamen met het onder 1) berekende DC rendement wordt het rendement van de gehele keten:

$\eta = 0.8 \times 0.5 \times 0.1 = 0.04 (= 4 \%)$.

Met andere woorden: **slechts 4 % van de energie die vrijkomt bij de verbranding van dieselolie is uiteindelijk beschikbaar als elektrische energie voor de verbruikers aan boord.**

9.6.4. Zonne-energie

In de zomer in Nederland leveren horizontaal gemonteerde zonnepanelen ca. 300 Wh per dag en per m^2 ($1 \text{ m}^2 = 2$ panelen van nominaal 50 W). Dit komt neer op een laadcapaciteit van 25 Ah per dag en per vierkante meter zonnecel in een 12 V accu. In het Middellandse Zee gebied stijgt de laadcapaciteit tot ca. 35 Ah en in het Caribische gebied tot 50 Ah. Zonnepanelen kunnen dus een aanzienlijke bijdrage aan de stroomvoorziening leveren, vooral op een catamaran of een motorboot omdat daar vaak veel dek- of dakruimte beschikbaar is.

9.6.5. Wind-energie

Een windgenerator met een diameter van 1 meter levert ca. 25 W (2 A in een accu van 12 V) bij een windsnelheid van 10 knopen. Een bijdrage van 40 tot 80 Ah per etmaal behoort zeker tot de mogelijkheden. Als het stroomverbruik aan boord laag is, kan ook een windgenerator zeer effectief zijn. Zelfs op grotere jachten zijn zonnepanelen en/of een windgenerator zeer geschikt voor het laden van de accu's en om ze 100 % geladen te houden tijdens periodes waarin het schip niet wordt gebruikt. Goede laadregelaars zijn echter zeer belangrijk om overladen te voorkomen.

9.6.6. Watergenerator (schroefasgenerator of gesleepte generator)

Tijdens het varen kan extra stroom worden opgewekt met een schroefasgenerator (nadelen: vaarweerstand, lawaai en slijtage), of met een kleine gesleepte watergenerator. De laatste zal ongeveer 12 W dwz 1 A leveren per knoop (snelheid door het water), d.w.z. 40 tot 100 Ah per etmaal laden in een 12 V accu.

De extra waterweerstand van ongeveer 30 kg zal de snelheid echter met ongeveer 0,5 knoop verlagen.

9.6.7. Walstroom

De beste manier om op de walstroom aan te sluiten is met een acculader dwz om het D.C.-concept toe te passen (zie par. 8.2.1 en 8.4.3). De vuistregel hierbij is dat de capaciteit van de acculader voldoende moet zijn om minstens twee maal de dagelijks aan boord benodigde energie te leveren. Indien de serviceaccu snel geladen moet worden dient een nog grotere acculader geïnstalleerd te worden.

Een voorbeeld:

Het volledig uitgeruste jacht beschreven in paragraaf 9.5. heeft wanneer het aan de wal ligt een dagelijkse energiebehoefte van 132 Ah of 1.6 kWh. (geen stroomverbruik van het toplicht, navigatie apparatuur, SSB, radar en watermaker)

- Bij twee keer de dagelijkse energiebehoefte moet de gelijkrichter 1.6 kWh $\times 2 / 24 \text{ h} = 133 \text{ W}$ leveren, wat bij 12 V neerkomt op $133 / 12 = 11 \text{ A}$.

Het gemiddelde DC-verbruik is $11 / 2 = 5.5 \text{ A}$, waardoor we 5.5 A over hebben om de accu op te laden. De minimum accucapaciteit was 500 Ah. Indien deze accu tot 50 % ontladen is zou het meer dan $(500 / 2) / 5.5 = 46 \text{ h}$ duren om de accu volledig te laden.

- Bij 4 keer de dagelijkse energiebehoefte moet de gelijkrichter 22 A leveren, waardoor er 16.5 A over is om de accu te laden. Een lading tot 80-90 % zou dan 15 h vergen.

In de praktijk zou men een gelijkrichter van 25 A of 50 A installeren. De gelijkrichter van 50 A zou

maximaal $50 \text{ A} \times 15 \text{ V} / 230 \text{ V} = 3.3 \text{ A}$ van de walaansluiting afnemen. Dus zelfs een walaansluiting van 4 A is dan voldoende.

Aansluiting van de warmwaterboiler direct op de walstroom zou een probleem kunnen zijn, omdat dit ca. 5 A extra walstroom zou vergen. De oplossing: **pas het DC-concept strikt toe en sluit de boiler via een omvormer aan op de serviceaccu.**

9.7. Conclusie

- Eén of meer alternatieve energiebronnen zoals zonnepanelen, een windgenerator, of een watergenerator kunnen een aanzienlijke bijdrage leveren aan de dagelijkse energiebehoefte van een jacht.
- De praktische limiet voor het dagelijks laden van een 12 V accu met dynamo's op de hoofdmotor is ongeveer 4 kWh of ca. 300 Ah bij 14 V. **Dit is echter voldoende voor alle extra luxe die in par. 9.5 wordt genoemd!**
- Bij 24 V, en ook weer met een wisselstroomdynamo van 150 A (een belasting van ca. 9 kW op de hoofdmotor!) kan men het dagelijkse energieverbruik tot 8 kW laten stijgen.
- Een inefficiënte koelkast (compressor van 50 W die draait met een duty cycle van 100 %) verbruikt 100 Ah per dag van uw kostbare accucapaciteit.
- Implementatie van het DC-concept, ook op walstroom, verlaagt de vereiste aansluitwaarde tot 4 A.

10. ENERGIE BEHOEFTE TOT 14 kWh PER ETMAAL (gemiddeld 600 W)

10.1. Inleiding

In hoofdstuk 9 hebben we gezien dat voor een energiebehoefte tot 4 kWh per dag een relatief eenvoudig DC-systeem prima voldoet. Naast de basisuitrusting, waarvoor ongeveer 1.5 kWh nodig was, was er dagelijks 2.5 kWh beschikbaar voor allerlei extra "luxe". De benodigde accucapaciteit varieerde van 250 Ah / 12 V voor het "basisjacht" tot 600 Ah / 12 V voor een "volledig uitgerust" jacht.

Zelfs bij een energie verbruik van meer dan 4 kWh per dag is een systeem met krachtige dynamo's op de hoofdmotor haalbaar (en de hoofdmotor is betrouwbaarder dan een kleine 3000 toeren generatorset!)

Vanwege het lawaai, stank, rendement en mogelijke schade aan de motor door teveel onbelast draaien is het echter zeker de moeite waard om de alternatieven te bekijken.

De alternatieven zijn:

- Een 230 V dieselgenerator die rechtstreeks aan de wisselstroomverbruikers levert: het AC-concept.
- Een 230 V generatorset met daarnaast nog een flinke serviceaccu: AC-concept. met generatorvrije periode
- Een DC-generator: uitbreiding van het DC-concept uit het vorige hoofdstuk tot een hoger vermogen.

Een dagelijks energieverbruik van 14 kWh is niet gering en zou wel eens het gemiddelde verbruik in uw eigen huis aan de wal kunnen zijn. U kunt het nakijken op uw elektriciteitsrekening!

Een dergelijk energieverbruik vinden op motorboten en catamaran zeiljachten tot ca. 15 meter (49 ft) of monohull zeiljachten tot 18 meter (59 ft).

De berekeningen zijn in dit hoofdstuk zijn gebaseerd op een serviceaccu van 24 V

Om te beginnen volgt hier de lijst met standaard uitrusting:

10.2. Uitrusting: het minimum

10.2.1. Navigatieapparatuur

Op grotere jachten is een navigatiecomputer bijna standaard. Met inbegrip van GPS, Marifoon, kortegolf zender, radar, Inmarsat, stijgt het gemiddelde stroomverbruik bij 24 V tot ca. 2 A.

10.2.2. Driekleuren toplicht en ankerlicht: 25 W

10.2.3. Stuurautomaat

Het energieverbruik is afhankelijk van het model, de zeegang, enz.
Gemiddeld: 5 A tot 10 A bij een duty cycle van 30 %.

10.2.4. Koelkast en vriezer

We gaan uit van een installatie met twee compressoren van 50 W en watergekoelde condensoren. Verder nemen we aan dat er speciale aandacht aan de isolatie is besteed om het verbruik laag te houden. Dit kan de duty cycle van de compressor van de koelkast tot 25 % en van de vriezer tot 50 % beperken.

10.2.5. Verlichting

Meer lichtpunten en minder zuinig gebruik dan op kleinere schepen.
Gemiddeld: 20 Ah per etmaal.

10.2.6. Radio: ca. 2 A.

10.2.7. Overige verbruikers

We gaan uit ervan uit dat er meer gebruik van pompen wordt gemaakt (bijv. voor de douche) en rekenen met 10 Ah bij 24 V.

10.3. Zeilen

Net zo als in hoofdstuk 9, zullen we nu het energieverbruik berekenen voor een periode van 24 uur onder zeil.

Verbruikers	Verbruik		Duur per etmaal	% aan	Verbruik per etmaal	
	Watt	Amp			Uren	%
C Navigatieapparatuur		2	24		1.2	48
L Navigatielicht	25	1	8		0.2	8
L Stuurautomaat		5	20	30	0.8	30
C Koelkast & vriezer, watergekoeld	50 + 50		24	25 + 50	0.9	38
K Radio		2	3		0.1	6
K Verlichting	400		1.2		0.5	20
K Diversen					0.2	10
Totaal verbruik per etmaal					3.8	160
Gemiddeld verbruik per etmaal	160	6.7				
Minimum accucapaciteit, uitgaande van 2 laadcycli per dag (zie par. 8.4.2)						320

Uit de tabel blijkt het volgende:

- Door in rendement en isolatie te investeren komt het energieverbruik van de koelkast en de vriezer nu overeen met dat van andere verbruikers. Maar al te vaak heeft een slechte installatie tot gevolg dat de compressoren bijna de gehele tijd in bedrijf zijn, wat nog eens 60 Ah aan het dagelijkse energieverbruik zou toevoegen!
- Terwijl men vaart is het minimum energieverbruik op een zeilschip van 12 tot 18 m ca. 4 kWh per etmaal. Dit komt overeen met 160 Ah uit een 24 V accu of 320 Ah uit een 12 V accu.
- De gemiddelde stroom die aan de accu wordt onttrokken is slechts 6.7 A bij 24 V en dus niet van belang als men op de motor vaart.

10.4. Voor anker of afgemeerd zonder 230 V aansluiting

De volgende tabel geldt voor zowel motorboten als zeilschepen.

Verbruikers	Verbruik		Duur per etmaal	% aan	Verbruik per etmaal	
	Watt	Amp			Uren	%
L Ankerlicht	25		8		0.2	8
L Koelkast & vriezer, watergekoeld	50 + 50		24	25 + 50	0.9	38
K Radio		2	3		0.1	6
K Verlichting	400		1.2		0.5	20
K Diversen					0.2	10
Totaal verbruik per etmaal					2.0	82
Gemiddeld verbruik per etmaal	82	3.4				
Minimum vereiste accucapaciteit, uitgaande van 2 laadcycli per dag (zie par. 8.4.2)						164

10.5. Extra's

Van de in paragraaf 9.5 van het vorige hoofdstuk genoemde extra's zijn het elektronische navigatiesysteem, de kortegolf zender en radar in de lijst van paragraaf 10.2 opgenomen.

Naast de andere extra's die in paragraaf 9.5 werden genoemd zijn er nog een paar meer die op grotere jachten voor kunnen komen:

10.5.1. Waterkoker

Heel handig voor het snel koken van water voor thee of instant soep. De warmtecapaciteit van 1 liter water is 1.16 Wh per °C, zie par. 6.3.3.. Dus het aan de kook brengen van 1 liter water onttrekt ca. 0.1 kWh, d.w.z. 4.2 Ah aan een 24 V accu.

10.5.2. Elektrische kookplaat

Gas aan boord is gevaarlijk en het verslepen van gasflessen is geen leuk karwei. Met 2 elektrische kookpitten van 1,5 kW elk is het afgenomen vermogen maximaal 3 kW (d.w.z. bijna 150 A bij 24 V), 4 pitten vragen maximaal 6 tot 8 kW. Het koken van een maaltijd voor 4 personen vergt ca. 1.2 kWh, d.w.z. 50 Ah bij 24 V (zie par. 6.6).

10.5.3. Kleine wasmachine

Deze is in par. 6.5 al even genoemd.

Het energieverbruik van één was/droog cyclus is ongeveer 2.7 kWh.

De meeste elektriciteit wordt gebruikt voor het verwarmen van het water en voor de droogcyclus. De wasmachine vullen met warm in plaats van koud water en het achterwege laten van een droogcyclus reduceert het energieverbruik tot ongeveer 0.5 kWh.

10.5.4. Kleine vaatwasmachine

Verbruik ca. 1 kWh

Het vullen van de vaatwasmachine met warm in plaats van koud water reduceert het energieverbruik tot minder dan 0.5 kWh.

We zullen nu het totale verbruik per etmaal berekenen als al deze luxe aan boord zou worden gebracht en gaan daarbij uit van een bemanning van 4 en een subtropisch klimaat, zodat in plaats van de verwarming de airconditioning wordt gebruikt.

In ons voorbeeld staat de airco 12 uur per dag aan en draait de compressor met een gemiddelde duty cycle van 50 %.

Op dezelfde wijze wordt een watermaker met een hoge druk pomp gebruikt in plaats van het veel energiezuiniger DC waterhydraulische type.

We gaan er ook van uit dat de wasmachine en de vaatwasmachine niet met warm water worden gevuld.

Verbruikers	Verbruik		Tijd / 24 uur	Verbruik / periode van 24 uur	
	Watt	Amp		kWh	Ah (24 V)
Magnetron	1500		0.25	0.4	16
Ketel, 6 liter per dag	2000			0.6	25
Elektrisch fornuis, 4 personen	6000			1.2	50
Verwarming		3	6 x 0.5 = 3		(9)
Airconditioning, koelcapaciteit 4 kW	1400		12 x 0.5 = 6	8.4	350
Watermaker, 200 liter per dag				1.4	60
Kleine wasmachine, eens per 2 dagen	2000			0.5 x 2.7	56
Kleine vaatwasmachine, dagelijks	2000			1.0	42
Meer pompen					10
Verbruik per etmaal				25	609

Uit de tabel blijkt dat de airconditioning bijzonder veel energie verbruikt, hoewel we zijn uitgegaan van slechts 12 uur gebruik per dag. Met een energiebehoefte van 8.4 kWh per dag, wat 350 Ah per dag betekent als de airconditioning (met een omvormer) op de accu zou draaien heeft de airconditioning meer energie nodig dan alle andere apparatuur samen! Er zou een accu van 1500 Ah nodig zijn om een generatorvrije periode van 20 uur te realiseren. Hoewel dergelijke installaties wel bestaan is de meer gebruikelijke oplossing om een generator te laten draaien wanneer de airco aan staat en het lawaai, onderhoud en brandstofverbruik voor lief te nemen.

De eerste stap voor het reduceren van het energieverbruik, als airco echt nodig is, is om airconditioning tot het minimum te beperken en tevens om de watermaker te vervangen door het efficiëntere (en veel minder lawaai producerende) DC waterhydraulisch type. Het resultaat is als volgt:

Verbruikers	Verbruik		Tijd / 24 uur	Verbruik / periode van 24 uur	
	Watt	Amp	Uren	kWh	Ah (24 V)
Magnetron	1500		0.25	0.4	16
Waterkoker, 6 liter per dag	2000			0.6	25
Elektrische kookplaten, 4 personen	6000			1.2	50
Verwarming		3	6 x 0.5 = 3		(9)
Airconditioning, koelcapaciteit 4 kW	700	29	12.x 0.5 = 6	4.2	175
Watermaker, 200 liter per dag		10	3.3	1.4	33
Kleine wasmachine, eens per 2 dagen	2000			0.5 x 2.7	56
Kleine vaatwasmachine, dagelijks	2000			1.0	42
Meer pompen					10
Verbruik per periode van 24 uur				9.6	407

Samen met het basisverbruik bedraagt het verbruik per etmaal nu:

- met airconditioning: $160 + 407 = 567$ Ah per periode van 24 uur
 bij een accustroom van gemiddeld: $567 / 24 = 24$ A.
 totaal energieverbruik per etmaal: $567 \times 24 = 13.6$ kWh.
- zonder airconditioning: $160 + 232 = 392$ Ah per periode van 24 uur
 bij een accustroom van gemiddeld: $392 / 24 = 16$ A.
 totaal energieverbruik per etmaal: $392 \times 24 = 9.4$ kWh.

10.6. Energieopwekking

10.6.1. Dynamo's op de hoofdmotor

Dit is zeker mogelijk, zie hoofdstuk 9.

10.6.2. Alternatieve energiebronnen

Zonnepanelen (1 m^2), een windgenerator (met een diameter van 1 meter) en een watergenerator (laten we zeggen 60 W bij een snelheid van 5 knopen) leveren samen bijna 2.4 kWh (= 100 Ah in een 24 V accu) per etmaal. Met andere woorden: de bijdrage van alternatieve energiebronnen kan het aantal motor uren dat nodig is om stroom te draaien aanzienlijk reduceren als er niet veel meer dan de basisuitrusting aan boord is.

Maar wanneer de dagelijkse energiebehoefte verder toeneemt, zijn er andere middelen nodig om elektriciteit op te wekken. De alternatieven worden in de volgende paragrafen besproken.

10.6.3. Dieselgenerator

De algemeen geaccepteerde methode om het (piek-) vermogen te leveren voor een wasmachine of een elektrische kookplaat een 230 V dieselgenerator, die wordt gestart wanneer de energie behoefte groot is. Om te voorkomen dat de generator continu moet draaien, of vele keren per dag gestart moet worden is er meestal ook nog een serviceaccu met omvormer aan boord. Dankzij de service accu en omvormer kunnen lange generator vrije periodes gepland worden. De generator zou bijvoorbeeld elke avond 2 tot 4 uur kunnen draaien, tijdens het koken en totdat de vaatwasmachine klaar is. Tijdens dezelfde 4 uur kan men de wasmachine en droger laten draaien, de watermaker en de acculaders aanzetten, en de boiler verwarmen (elektrisch of met koelwater van de generator). Indien nodig kan men tijdens het ontbijt een tweede generatorperiode van 1 of 2 uur inlassen.

In het algemeen wordt de generatorperiode om de volgende redenen zo kort mogelijk gehouden:

- lawaai en trillingen
- slijtage en onderhoud
- het voorkomen van gebruik met weinig belasting, omdat dit leidt tot versnelde slijtage en onderhoud (verglazen)
- brandstofverbruik

Verder is het voor de betrouwbaarheid en duurzaamheid raadzaam om een 1500 tpm model te kiezen.

Capaciteit van de serviceaccu

Als we weten hoe lang de generator zal draaien – in ons voorbeeld tenminste 4 uur per dag, kunnen we berekenen hoeveel Ah de accu tijdens de generatorvrije periode moet leveren:

a) Varend, ongeveer $24 - 4 = 20$ uur van het basis energieverbruik zoals uiteengezet in par. 10.3, of $160 \times 20 / 24 = 133$ Ah.

b) Met betrekking tot de andere apparatuur zullen we aannemen dat het gebruik van de magnetron, waterkoker en tweederde van de airconditioning tijd ook in de generatorvrije periode vallen. Dit betekent een ontlading van de accu met $16 + 25 + 175 \times 2/3 = 158$ Ah.

Totaal $133 + 158 = 291$ Ah. Hiervoor hebben we een accu nodig van tenminste 600 Ah, (2 laadcycli per dag, zie par. 8.5.2.) en met wat reserve (airco gebruik tijdens de nacht), komen we op 800 Ah.

Omvormers en acculaders

Als omvormer is een Multi 24/3000/70 gecombineerde omvormer/acculader groot genoeg (omdat de generator kan worden gestart wanneer er meer dan 3 kW nodig is), maar als lader levert de Multi tijdens de generatorperiode van 4 uur slechts $4 \times 70 = 280$ Ah. Tijdens die periode moet er 291 Ah geladen worden, plus nog eens 4 uur basisbelasting, d.w.z. $6,7 \times 4 = 27$ Ah. Met een kleine marge hebben we dan 100 A laadstroom nodig. Daarom moet er naast de Multi nog een 24 V / 50 A lader worden geïnstalleerd.

De generator

Voor de kookplaten zou 6 kW nodig zijn, plus $100 \text{ A} \times 30 \text{ V} = 3 \text{ kW}$ voor de laadapparatuur. Met enige marge om tenminste een deel van de extra apparatuur te kunnen gebruiken (bijvoorbeeld de AC-airco) zou de juiste keuze 12 kW zijn.

Walstroom aansluiting en frequentie omvormer

In ons voorbeeld kan de walstroom afname tot ca. 8 kW worden beperkt, omdat er veel meer tijd is om de accu te laden. Voor 8 kW is echter wel een driefasen (krachtstroom) aansluiting nodig.

Indien u de oceaan oversteekt krijgt u te maken met 60 Hz walstroom. Voor de 50 Hz apparatuur op uw schip heeft u dan ook een frequentieomvormer van 8 kW nodig.

Halverwege de berekening dacht u waarschijnlijk al dat dit niet praktisch is op een zeilschip van 15 meter of een motorjacht van 13 meter. Het systeem wordt te groot, te duur, te zwaar en te gecompliceerd. Dat klopt!

Daarom wordt een installatie als hierboven beschreven eigenlijk alleen op grotere schepen gebruikt, bijvoorbeeld zeiljachten vanaf 20 meter of motorjachten vanaf 15 meter.

Wat is de oplossing voor kleinere schepen?

1) De voor de hand liggende oplossing zou zijn om af te zien van de elektrische kookplaat en in plaats daarvan gas te gebruiken. Dan zou een 6 kW generator die 4 tot 8 uur per dag draait, afhankelijk van de hoeveelheid airconditioning, voldoende zijn.

2) Airconditioning kan beperkt worden tot de uren waarop de generator draait.

3) De walstroom kan door het toepassen van het DC-concept (zie par. 8.2. en 8.5.3.) worden teruggebracht van 8 kW tot slechts ca. 1.2 kW (in Europa zou dit een 1-fase 230 V 6 A walaansluiting betekenen). Frequentie omvormen van 60 Hz naar 50 Hz is dan een in het systeem ingebouwde functie. Om het DC-concept toe te passen moet de walstroom op een gelijkrichter van 40 A of 50 A worden aangesloten die de accu laadt. Alle AC-verbruikers aan boord worden dan gevoed door 2 of 3 parallelle omvormers van elk 2.5 kW (of bij voorkeur Multi's, zie de volgende paragraaf).

In de volgende paragraaf worden nog twee alternatieven om het vermogen van de generator te verlagen besproken.

10.6.4. *PowerControl* en *PowerAssist*

Het gebruik van Multi's en *PowerControl* samen met een generator heeft de volgende voordelen (zie ook hoofdstuk 8):

- Ononderbroken AC-voeding. Als de generator uit is leveren de Multi's de wisselstroom aan boord. Nadat de generator is gestart zal de belasting automatisch en zonder onderbreking naar de generator worden overgeschakeld en de Multi's schakelen dan over op de acculader functie. Het omgekeerde proces vindt plaats als de generator wordt stopgezet.
- Door de *PowerControl* functie wordt het risico van overbelasting van de generator uitgesloten. De laadstroom van de accu wordt automatisch verlaagd als de energie behoefte van de Multi's (die met 2 Multi's op kan lopen tot $2 \times 70 \text{ A} \times 30 \text{ V} = 4.2 \text{ kW}$), samen met andere verbruikers anders zou leiden tot overbelasting.

***PowerAssist*: de MultiPlus als walstroom en generator booster**

PowerAssist is de "bijlever" functie van de Phoenix MultiPlus (zie ook hoofdstuk 8).

Laten we eerst bijleveren met een generator bekijken, bijvoorbeeld de 6 kW generator uit de vorige paragraaf.

Twee Multi's in parallel kunnen 5 kW vermogen toevoegen, zodat het piekvermogen stijgt van 6 kW tot 11 kW. Dit brengt de elektrische kookplaat terug aan boord. Als het verbruik daalt tot minder dan een van tevoren ingestelde limiet (die in ons voorbeeld 5 kW voor de generator van 6 kW zou zijn, om de generator niet voortdurend op volle belasting te laten draaien), gebruiken de Multi's de overtollige energie van de generator om de accu's te laden, tot maximaal $2 \times 70 = 140 \text{ A}$.

Op dezelfde wijze voegen de 2 Multi's 5 kW aan de walaansluiting toe. Een walaansluiting van 16 A (d.w.z. $16 \times 230 = 3680 \text{ W}$, of 3.7 kW) kan met 2 Multi's dus van 3.7 kW tot $3.7 + 5 = 8.7 \text{ kW}$ "opgevoerd" worden.

Elektrisch koken op walstroom is geen probleem meer!

10.6.5. **Nog minder walstroom: het DC-concept**

Het DC-concept verlaagt de benodigde walstroom tot ongeveer twee keer het gemiddelde stroomverbruik aan boord (zie par. 8.4.3.). Als het gemiddelde verbruik 600 W of minder is (= tot 14 kWh per etmaal) zou een 50 A acculader (stroomlimiet ingesteld op $1200 \text{ W} / 30 \text{ V} = 40 \text{ A}$) op een 6 A walaansluiting nog in staat zijn om de gemiddeld benodigde energie te leveren. Twee, of zelfs drie parallelle Multi's (die ook parallel met de generator kunnen draaien) kunnen alle AC-apparatuur aan boord voeden.

Van de 40 A die de acculader levert is ongeveer 20 A beschikbaar om de 800 Ah accu te laden. Indien de accu tot 50 % ontladen was, duurt dit $400 / 20 = 20$ uur.

Met het DC-concept is de stroomvoorziening aan boord ongevoelig voor spanningsfluctuaties en andere storingen van de walaansluiting. Bovendien werkt het systeem net zo goed op een 60 Hz als op een 50 Hz aansluiting.

10.6.6. **De 230 V dieselgenerator op een relatief klein schip: conclusie**

Gewoonlijk wordt het generatorvermogen bepaald op basis van de maximale vermogens behoefte die aan boord voor kan komen. Tengevolge van alle huishoudelijke apparatuur die tegenwoordig wordt geïnstalleerd is de gebruikelijke walstroom aansluiting van ten hoogste 16 A te zwak. Gevolg: ook in de haven moet de generator gestart worden om te wassen of te koken. In plaats van concessies te doen wat betreft het comfort aan boord, kan nieuwe technologie worden toegepast om de kosten, omvang en gewicht van het elektrische systeem te verlagen.

Door aan het systeem 3 Multi's met *PowerAssist* en een acculader van 50 A toe te voegen wordt het mogelijk om:

- 2 generatorvrije periodes per dag van in totaal 20 uur te introduceren
- Het vermogen van de generator van 12 kW terug te brengen tot 6 kW
- De benodigde walstroom terug te brengen van 8 kW (driefasen 16 A) tot slechts 1.3 kW (6 A walstroom aansluiting)
- De noodzaak van een frequentie omvormer voor aansluiting op 60 Hz walstroom te elimineren;
- Ononderbroken AC-voeding aan boord te realiseren;
- Gas aan boord te elimineren en daarmee de veiligheid aanzienlijk te verhogen.

10.6.7. De diesel-gelijkstroomgenerator of DC-generator

Naast conventionele 230 V generatoren bieden steeds meer leveranciers ook DC-generatoren aan. Met vermogens tot 10 kW kan hiermee een accu laadstroom tot ongeveer 300 A bij 28 V worden gerealiseerd. DC-generatoren zijn kleiner en lichter en hebben een hoger rendement dan AC-generatoren. Bovendien kan het motortoerental op de stroombehoefte worden afgestemd, zodat het rendement hoog blijft, zelfs bij lage belasting.

De DC-generator wordt gebruikt om de accu's te laden. Met omvormers wordt vervolgens wisselstroom gemaakt. Het kiezen van het vermogen van een DC-generator is een kwestie van acceptabele acculaadstroom en het aantal bedrijfsuren per dag. Met een elektriciteitsbehoefte van 14 kWh per dag zou een DC-generator van 6 kW bijvoorbeeld 2-3 uur per dag draaien.

10.6.8. Rendement van een dieselgenerator

Het rendement van een dieselgenerator is meer dan 30 % bij volle belasting. Het rendement daalt bij afnemende belasting. Op een jacht zal een generatorset meestal op lage belasting draaien. Het rendement zal dan 10 tot 20 % zijn. Het rendement kan aanzienlijk worden verbeterd met **PowerControl** of **PowerAssist** omdat dan met een kleinere generator die wel voldoende belast wordt volstaan kan worden (zie par. 8.3.3 en 8.4).

10.6.9. De energievoorziening op een motorjacht van 9 tot 15 meter of een jacht dat voor anker ligt.

Zelfs als de complete wensenlijst van paragraaf 10.5 is geïnstalleerd kunnen de wisselstroomdynamo's op de hoofdmotoren van een motorjacht het gemiddelde verbruik van 24 A bij 24 V DC gemakkelijk bijhouden tijdens het varen. Met andere woorden: als men verwacht bijna elke dag een paar uur te varen of als er elke avond walstroom beschikbaar is, kan een dagelijks energieverbruik van 14 kWh geleverd worden zonder een dieselgenerator te installeren.

Als de boot voor anker ligt neemt het verbruik af tot ca. 22 A, omdat de navigatieapparatuur is uitgeschakeld. Als men gedurende langere tijd voor anker ligt zal er een generator nodig zijn, zoals besproken in par. 10.6.3 tot 10.6.7.

10.6. Conclusie.

In de volgende tabel worden de besproken alternatieven opgesomd.

Energie behoefte tot 14 kWh per etmaal (gemiddeld 600 W)			
	5 kW DC generator	6 kW dieselgenerator met <i>PowerAssist</i>	12 kW dieselgenerator
DC generator			
Uren per etmaal	3 tot 8		
Verbruik per etmaal	7 liter		
Gewicht	150 kg		
Dieselgenerator			
Uren per periode van 24 uur		3 tot 8	4 tot 8
Verbruik		9 liter	11 liter
Geluid		67 dBA	69 dBA
Gewicht		250 kg	350 kg
Accu			
Capaciteit	24 V / 800 Ah	24 V / 800 Ah	24 V / 800 Ah
Gewicht	700 kg	700 kg	700 kg
Walstroom			
Vermogen	6 A	6 A (DC-concept)	3-fasen 8 kW
Acculaders	50 A 8 kg	50 A 8 kg	50 A 8 kg
50 / 60 Hz walstroomconversie	Ja, geen extra frequentie-omvormer voor walstroom nodig	Ja geen extra frequentie-omvormer voor walstroom nodig	Nee, extra frequentie-omvormer voor walstroom nodig
DC-AC omvormers			
Vermogen	7.5 kW (3 x Phoenix omvormer 2.5 kW)	7.5 kW (3 x MultiPlus)	2.5 kW Multi
Gewicht	54 kg	54 kg	18 kg
Totaal gewicht van de installatie	962 kg	1012 kg	1076 kg
2 weken brandstof	98 liter	126 liter	154 liter
Totaal gewicht met inbegrip van 2 weken brandstof	990 kg	1118 kg	1205 kg

Uit de tabel blijkt het volgende:

10.7.1. De conventionele oplossing: een 12 KW generator

Dit alternatief is zwaar en volumineus.

De gemiddelde belasting van een generator van 12 kW zou zijn:

-bij 4 bedrijfsuren per dag: $14 / (4 \times 12) = 29 \%$

-bij 6 bedrijfsuren per dag: $14 / (6 \times 12) = 19 \%$

De walstroombehoefte zal in de orde van grootte liggen van 8 kW, tenzij het DC-concept voor de walstroom wordt gebruikt; in dat geval is een aansluiting van 6 A (= 1,38 kW) voldoende.

10.7.2. Een betere oplossing: minder gewicht en ruimte met een generator van 6 kW en *PowerAssist*, of een 5 kW DC generator

Voor het gebruik van *PowerAssist* bij een dieselgenerator van 6 kW zouden in ons voorbeeld van het volledig uitgeruste jacht 2 Multi's nodig zijn. Bij toepassing van het DC-concept voor walstroom zouden 3 Multi's nodig zijn.

11. ENERGIE BEHOEFTE TOT 48 kWh PER ETMAAL (gemiddeld 2 kW)

11.1. Inleiding

In hoofdstuk 10 hebben we gekeken naar schepen die maximaal 14 kWh elektrische energie per dag nodig hebben. We concludeerden dat 14 kWh per dag voldoende is voor 1 huishouden van 4 tot 6 personen, ongeacht of zij op een schip of in een huis wonen, met alle gebruikelijke elektrische huishoudelijke apparatuur tot hun beschikking, zolang airconditioning niet nodig is of beperkt wordt gebruikt.

We hebben ook gezien dat een dagelijkse elektriciteitsbehoefte van 4 tot 14 kWh kenmerkend is voor motorboten of catamaran zeiljachten van 9 tot 15 meter of monohull zeiljachten van 12 tot 18 meter.

Op een jacht van slechts een paar meter langer neemt het elektriciteitsverbruik vaak onevenredig toe. Deze jachten, of ze nu gehuurd zijn of niet, hebben vaak een professionele bemanning aan boord en in plaats van 4 tot 6 personen aan boord zijn het er 8 tot 12. Er wordt meestal in subtropische of tropische wateren gevaren en de airco staat vaak 12 uur of zelfs 24 uur per dag aan.

Het energieprobleem wordt meestal als volgt opgelost:

- Een dieselgenerator 24 uur per dag laten draaien, of
 - behalve een dieselgenerator ook een grote accu installeren voor een generatorvrije periode van 8 tot 20 uur.
- Er is ook veel walstroom nodig (en dit beperkt de mogelijkheden aanzienlijk als men een aanlegplaats in een jachthaven zoekt), omdat de accu in het algemeen niet als *peak shaver* wordt gebruikt. Een dure en zware frequentieomvormer is nodig om 60 Hz walstroom om te vormen tot 50 Hz of omgekeerd.

Laten we een kijkje nemen aan boord van een jacht met een gemiddelde dagelijkse energiebehoefte van 48 kWh, wat neerkomt op een gemiddeld stroomverbruik van 2 kW.

11.2. De belangrijkste verbruikers

De belangrijkste continue en langdurige verbruikers zijn:

- Koelkasten en vriezers: gemiddeld 300 W
- Airconditioning: 12 kW (41.000 BTU) met een opgenomen elektrisch vermogen van 3 kW

De belangrijkste kortstondige verbruikers die veel elektriciteit verbruiken zijn:

- Een elektrische kookplaat met 6 kookplekken + ovens: 12 kW
- Een watermaker van het hogedruk pomp type voor 300 l per uur: 3 kW (aanloopstroom 15 kW)
- Wasmachine(s) en vaatwasmachine(s): 6 tot 12 kW
- Eventueel een duikcompressor

Andere verbruikers zijn minder belangrijk voor het bepalen van de omvang van het systeem. We gaan uit van een gemiddeld verbruik van 2 kW.

11.3. Energieopwekking

11.3.1. Het generator schip: de generator draait 24 uur per dag

Ervan uitgaande dat andere belangrijke kortstondige verbruikers tijdens het koken uitgeschakeld zijn en dat in de praktijk de kookplekken en ovens nooit gelijktijdig op maximum vermogen staan is een generator van minstens 15 kW nodig. In de praktijk wordt dan een generator van 20 kW geïnstalleerd. Vaak wordt deze generator ook voorzien van een hydraulische power take-off voor de boegschroef. Als voor continu generator gebruik wordt gekozen kan er een tweede, kleinere generator van laten we zeggen 6 kW worden toegevoegd voor de periodes waarin veel minder stroom nodig is. De accu's en acculaders zouden in dit geval zeer klein blijven: bijna al het vermogen wordt immers door de generatoren geleverd.

Hoewel op het eerste gezicht eenvoudig en goedkoop, heeft deze oplossing enkele ernstige nadelen:

- Om een ononderbroken stroomvoorziening te garanderen wanneer overgeschakeld wordt van de ene naar de andere generator of van de generator naar de walaansluiting, moeten synchronisatiesystemen worden toegevoegd (complex en duur).
- Er is een walstroom aansluiting nodig van 20 kW (32 A driefasen).
- Er is een dure en zware 20 kW frequentieomvormer nodig om aan de andere kant van de Atlantische Oceaan op walstroom aan te sluiten.
- Een generator van 20 kW die 24 uur per dag draait zou een gemiddelde belasting hebben van slechts $2 / 20 = 10\%$! Dit is niet goed voor de generator en ook niet goed voor het brandstofverbruik. Door een tweede, kleinere generator toe te voegen stijgt de gemiddelde belasting tot ongeveer 20%. Dit is beter, maar nog steeds slecht.
- En dan natuurlijk het lawaai, de trillingen, de dieseldampen en de vervuiling 24 uur per dag...(en

vergeet niet dat er steeds meer jachthavens en natuurreservaten zijn waar het gebruik van een generator verboden is).

11.3.2. Een accu toevoegen voor een generatorvrije periode

Dit alternatief brengt ons terug naar 10.6.3, maar de accu wordt veel groter.

Accucapaciteit

De accucapaciteit hangt af van de duur van de generatorvrije periode en, heel belangrijk, het gebruik van airconditioning. Laten we aannemen dat de generator tenminste twee keer per dag draait, wanneer de kookplaat en/of ovens in gebruik zijn, als de watermaker is ingeschakeld en tijdens het wassen en/of afwassen. Met andere woorden: gedurende ongeveer 8 uur per dag. Verder gaan we uit van een gemiddelde accubelasting tijdens de generatorvrije periodes van 1.5 kW (= 63 A), wat resulteert in $1.5 \times (24 - 8) = 24$ kWh of $24 \text{ kWh} / 24 \text{ V} = 1000$ Ah die per dag aan de accu wordt onttrokken.

Toepassing van de vuistregel van par. 8.5.2 betekent een accucapaciteit van 2000 Ah.

Van de 48 kWh die per etmaal nodig is wordt in dit voorbeeld 24 kWh door de accu geleverd en de resterende 24 kWh direct door de generator.

De generator

Binnen 8 uur moet de generator 1000 Ah laden. We hebben een laadstroom nodig die iets hoger is dan $1000 / 8 = 125$ A, bijvoorbeeld 175 A. Voor de generator betekent dit een belasting van $175 \times 30 = 5.25$ kW. Dit kan worden gedaan met de eerder genoemde generator van 20 kW, mits de acculaders zijn uitgeschakeld als er piekstromen nodig is voor het koken plus enkele andere elektrische apparaten die tegelijkertijd worden gebruikt. De door de generator te leveren energie is dan $1000 \text{ Ah} \times 30 \text{ V} = 30$ kWh voor de accu, plus de 24 kWh die direct aan de aangesloten apparatuur wordt geleverd: totaal $30 + 24 = 54$ kWh, met inbegrip van de laad/ontlaad verliezen.

Door een accu van 2000 Ah aan het systeem toe te voegen hebben we:

- stilte aan boord dankzij 2 generatorvrije periodes van gemiddeld 8 uur
- het generatorgebruik van 24 naar 8 uur per dag teruggebracht;
- de gemiddelde belasting van de generator van 2 kW naar $54 / 8 = 6.75$ kW verhoogd.

Maar we hebben nog steeds een walstroomaansluiting van 15 kW en een 50/60 Hz frequentieomvormer nodig.

11.3.3. Parallele Multi's met *PowerControl* en het DC-concept voor walstroom:

Het gebruik van Multi's en *PowerControl* samen met de generator heeft de volgende voordelen (zie ook hoofdstuk 8):

- In plaats van een driefasen generator kan een één fase model worden gebruikt. Walstroom wordt ook één fase (zie onder).
- Ononderbroken voeding. Als de generator stil staat leveren de Multi's de wisselstroom aan boord. Nadat de generator is gestart zal de belasting automatisch en zonder onderbreking naar de generator worden overgeschakeld en de Multi's schakelen dan over op de acculaderfunctie. Het omgekeerde proces vindt plaats als de generator wordt stopgezet.
- Door de *PowerControl* functie wordt het risico van overbelasting van de generator uitgesloten. De laadstroom van de accu wordt automatisch verlaagd als de energie behoefte van de Multi's (die met 5 Multi's op kan lopen tot $5 \times 70 \text{ A} \times 30 \text{ V} = 10.5$ kW), samen met andere verbruikers anders zou leiden tot overbelasting.
- Door het DC-concept toe te passen kan de walstroom van 15 kW tot 3.5 kW worden teruggebracht (in Europa zou dit een één fase walaansluiting van 230 V 16 A betekenen in plaats van een driefasen aansluiting) en 50/60 Hz frequentieconversie is een ingebouwde functie van het systeem. Om het DC-concept toe te passen moet de walstroom worden aangesloten op een of meer acculaders die gezamenlijk 100 A kunnen leveren. De installatie aan boord wordt dan door de 5 parallelle Multi's gevoed. De 5 parallelle Multi's hebben 10 kW continu vermogen en kunnen gedurende korte tijd 15 kW leveren. Op het eerste gezicht lijkt 100 A laadstroom misschien een beetje weinig: een dagelijkse energie behoefte van 48 kWh betekent bij 24 V een gemiddelde stroom van $(48 \text{ kWh} / 24 \text{ h}) / 24 \text{ V} = 83$ A. Maar aan de andere kant is het zeer aantrekkelijk om met een walaansluiting van slechts 16 A te kunnen volstaan. In de praktijk zal wanneer de boot aan de wal ligt de energie behoefte bovendien veel lager zijn omdat de watermaker, navigatieapparatuur enz. niet worden gebruikt en de bemanning met verlof aan de wal is.

11.3.4. 1 stap verder: de MultiPlus en PowerAssist

Als de energie behoefte 48 kWh is per etmaal, en 54 kWh inclusief laad/ontlaad verliezen, dan moet de generator gedurende de 8 generator uren **gemiddeld** $54 / 8 = 6.75$ kW leveren. Op basis van het gemiddelde vermogen plus wat marge zou dus ipv een 20 kW een 10 kW generator toegepast kunnen worden (zie par. 8.3. en 8.4.).

Installatie van 5x MultiPlus en **PowerAssist**. verhoogt het vermogen van 10 kW tot $10 + 5 \times 2.5 = 22.5$ kW.

Zodra het afgenomen vermogen toeneemt tot boven een van tevoren ingestelde limiet (bijvoorbeeld 8 kW om de generator niet op volle belasting te laten draaien), gaan de Multi's vermogen bijleveren. De beschikbare energie van de 2000 Ah accu ($24 \times 2000 \times 0.5 = 24$ kWh) is meer dan voldoende om aan de kortstondige energiebehoefte tijdens bijlever periodes te voldoen.

Zodra het afgenomen vermogen daalt tot minder dan 8 kW, zullen de Multi's de overtollige energie van de generator gebruiken om de accu's te laden. De maximale laadstroom van 5 parallelle Multi's is $5 \times 70 = 350$ A, wat $350 \text{ A} \times 30 = 10.5$ kW aan de generator zou onttrekken. Veel meer dan nodig is en zelfs meer dan de generator kan leveren.

Walstroom

Wanneer men gebruik maakt van walstroom is de beste oplossing, het DC- concept zoals beschreven in par. 11.3.3.

De dieselgenerator: conclusie

Door een accu van 2000 Ah, 5x MultiPlus met *PowerAssist* en een gelijkrichter van 100 A aan het systeem toe te voegen kunnen we nu:

- 2 generatorvrije periodes per dag van in totaal 16 uur introduceren
- het vermogen van de generator terugbrengen van 20 kW (driefasen) naar 10 kW (één-fase)
- de benodigde walstroom reduceren van 15 kW (driefasen 25 A) tot slechts 3 kW (16 A 230 V walaansluiting);
- een frequentieomvormer van 15 kW voor aansluiting op 60 Hz walstroom elimineren;
- een ononderbroken stroomvoorziening aan boord realiseren;
- de redundantie van het systeem en daarmee de veiligheid aanzienlijk verhogen.

11.3.5. De DC-generator

Een alternatief voor de 230 V generator van 10 kW is een DC-generator van 10 kW. Zie paragraaf 10.6.7.

11.3.6. Toevoeging van kleine DC "hulp" generator teneinde het aantal draaiuren van de grote generator en de benodigde accucapaciteit te verminderen

Op een groot schip kan een kleine generator zodanig geïnstalleerd worden dat hij onhoorbaar is.

- De accu capaciteit zou dan verlaagd kunnen worden tot ca. 1000 Ah.
- De grote generator hoeft minder gebruikt te worden.

11.4. Conclusie

Een vergelijking van de alternatieven voor 48 kWh per dag:

Energie behoefte tot 48 kWh per etmaal (gemiddeld 2 kW)			
	10 kW AC generator met <i>PowerAssist</i> , plus een hulp set	20 kW dieselgenerator met <i>PowerControl</i> plus een hulp set	20 kW dieselgenerator met generatorvrije periode
Hulp set, 5 kW			
Uren per etmaal	12	12	n.v.t.
Verbruik per etmaal	8 liter	8 liter	n.v.t.
Gewicht	150 kg	150 kg	n.v.t.
Generator			
Uren per etmaal	6	6	8
Verbruik per etmaal	15 liter	20 liter	30 liter
Gewicht	300 kg	450 kg	450 kg
Accu			
Capaciteit	24 V 1000 Ah	24 V 1000 Ah	24 V 2000 Ah
Gewicht	1000 kg	1000 kg	2000 kg
Walstroom			
	3,5 kW	3,5 kW	15 kW
Aansluitwaarde	16 A 1-fase	16 A 1-fase	32 A 3-fase
Auto-transformer 110 – 230 V	Niet nodig als acculaders met universele 90-265 V ingang worden gebruikt	Niet nodig als acculaders met universele 90-265 V ingang worden gebruikt	n.v.t.
Gewicht 15 kW frequentie omvormer	Niet nodig	Niet nodig	545 kg
Laders / Omvormers			
Acculaders	100 A 12 kg	100 A 12 kg	200 A 24 kg
Omvormers	12,5 kW (5 x MultiPlus)	10 kW (4 x Multi)	2,5 kW
Gewicht	90 kg	72 kg	18 kg
Totaal gewicht van de installatie	1552 kg	1684 kg	3037 kg

Uit de tabel blijkt het volgende:

11.4.1. De 20 kW generator met generatorvrije periode (rechterkolom)

Dit alternatief is zwaar en de accu van 2000 Ah is duur, met het risico van hoge kosten als er een fout wordt gemaakt bij het beheren van de accu of zich een ongeluk voordoet, zoals bijvoorbeeld een defecte cel. Het alternatief, de generator 24 uur per dag gebruiken is ook niet erg aantrekkelijk. Een tweede generator van bijvoorbeeld 6 kW zou het grootste deel van de dag kunnen worden gebruikt, waarbij de generator van 20 kW wordt ingezet als er meer vermogen nodig is. Naast lawaai en vervuiling zullen de gebruikskosten hoog zijn: zelfs een 1500 tpm generator zal elke 8000 tot 25000 uren (1 tot 3 jaar) een grondige revisie nodig hebben en natuurlijk regelmatig onderhoud. Voor aansluiting aan de andere kant van de oceaan zal een dure en zware frequentieomvormer geïnstalleerd moeten worden.

11.4.2. *PowerControl* en het DC-concept voor walstroom, en een hulp set om de accucapaciteit te reduceren (middelste kolom)

Door het DC-concept toe te passen wordt het walstroom probleem opgelost (zie par.11.3.3.). Door een kleine generator (AC of DC) toe te voegen kan de accucapaciteit tot 1000 Ah worden gereduceerd, waardoor ook het gewicht met 1000 kg wordt verminderd.

11.4.3. Een kleinere generator met *PowerAssist*, het DC-concept voor walstroom en een DC generator (linker kolom)

Het belangrijkste verschil in vergelijking met 11.4.2 is de kleinere generator (10 kW ipv 20 kW), waardoor het gewicht met nog eens 130 kg wordt gereduceerd.

12. ENERGIE BEHOEFTE TOT 240 kWh PER ETMAAL (gemiddeld 10 kW)

12.1. Inleiding

In hoofdstuk 11 hebben we gezien dat de omvang, het gewicht en de complexiteit van het energiesysteem dankzij nieuwe technologie aanzienlijk kunnen worden verminderd. Hieronder zullen we nog hogere energievereisten bekijken en zien wat de rol van Multi's kan zijn.

12.2. De belangrijkste verbruikers

Een gemiddeld verbruik van 10 kW geldt voor schepen tot ca. 30 meter.

- De grootste elektriciteitsverbruiker is in het algemeen de airconditioning, die in tropische gebieden dag en nacht aan zal staan. De nominale koelcapaciteit kan bijvoorbeeld 100,000 BTU (= 30 kW) zijn. Met een CoP (zie paragraaf 6.2.) van 4 betekent dit dat er $30 / 4 = 7.5$ kW nodig is als de airconditioning op volle toeren moet draaien. Bij een gemiddeld opgenomen vermogen van 5 kW is het koelen van lucht goed voor de helft van de energie behoefte aan boord!
- De andere belangrijke verbruikers zijn keukenapparatuur, wasmachines/drogers, de watermaker en de verlichting. De gemiddelde vermogensbehoefte zal 's nachts lager zijn dan overdag, bijvoorbeeld in een verhouding van 5 tot 15 kW.

12.3. Energieopwekking

12.3.1. Generatoren

De hoofdgenerator kan bijvoorbeeld een vermogen hebben van 50 kW. Een tweede generator van bijvoorbeeld 8 kW kan worden ingezet als er minder mensen aan boord zijn. Deze opzet heeft dezelfde nadelen als in par. 11.3.1 werden genoemd:

- Om een ononderbroken stroomvoorziening te garanderen wanneer overgeschakeld wordt van de ene naar de andere generator of van de generator naar de walaansluiting, moeten synchronisatiesystemen worden toegevoegd.
- Er is een walstroomaansluiting nodig van 50 kW.
- Er is een dure en zware 50 kW frequentieomvormer nodig om aan de andere kant van de Atlantische Oceaan op walstroom aan te sluiten.
- Een generator van 50 kW die 24 uur per dag draait zou een gemiddelde belasting hebben van slechts $10 / 50 = 20$ %! Dit is niet goed voor de generator en ook niet goed voor het brandstofverbruik. Door een tweede, kleinere generator toe te voegen stijgt dit cijfer tot ongeveer 30 %. Dit is beter, maar nog steeds slecht.
- En dan natuurlijk het lawaai, de trillingen, de dieseldampen en de vervuiling 24 uur per dag... (en vergeet niet dat er steeds meer jachthavens en natuureservaten zijn waar het gebruik van een generator verboden is).

12.3.2. Een extra accu voor een generatorvrije periode, en accu-ondersteund generatorgebruik (*PowerAssist*)

Dit alternatief heeft alleen zin als een vermogensbehoefte van 50 kW slechts bij uitzondering voorkomt en kortstondig is, en meestal beneden de 20 kW blijft.

De accu

Als het verbruik gedurende flinke periodes kan worden gereduceerd tot een gemiddelde van 4.5 kW, bijvoorbeeld 8 uur tijdens de nacht en 6 tot 8 uur overdag, zou de maximale hoeveelheid door de accu te leveren energie $4.5 \times 16 = 72$ kWh dwz $72 \text{ kWh} / 24 \text{ V} = 3000$ Ah zijn. Als we onze vuistregel van par. 8.5.2 toepassen is er een accu van 6000 Ah nodig.

De generator, Multi's en walstroom

Nu moeten we anders gaan denken, en niet meer naar de benodigde piekstroom kijken maar in plaats daarvan naar de dagelijkse energiebehoefte (zie par. 8.5.).

Van de 240 kWh die per dag nodig is wordt in dit voorbeeld 72 kWh door de accu geleverd en de resterende 168 kWh rechtstreeks door de generator.

De hoeveelheid energie die nodig is om de accu op te laden is $3000 \text{ Ah} \times 30 \text{ V} = 90 \text{ kWh}$.

De dagelijks door de generator te leveren energie bedraagt dus $168 + 90 = 258 \text{ kWh}$.

De generator, die tenminste 8 uur per dag draait moet een nominaal vermogen hebben van $258 / 8 = 32 \text{ kW}$. Met enige marge kan 40 kW worden geïnstalleerd.

Door 5 Multi's per fase toe te voegen wordt het continue uitgangsvermogen verhoogd met $15 \times 2.5 = 37.5 \text{ kW}$ tot $40 + 37.5 = 77.5 \text{ kW}$. Als de behoefte aan AC verder toeneemt dan een van tevoren ingestelde limiet, bijvoorbeeld 35 kW om de generator niet op volle belasting te laten draaien, beginnen de Multi's "bij" te leveren. De beschikbare energie van de 6000 Ah accu ($24 \times 6000 \times 0.5 = 72 \text{ kWh}$) is meer dan voldoende om enige tijd 10 tot 20 kW bij te leveren. Zodra het afgenomen vermogen daalt tot minder dan 35 kW, zullen de Multi's de overtollige energie van de generator gebruiken om de accu's op te laden. De maximale laadstroom van 15 parallelle Multi's is $15 \times 70 = 1050 \text{ A}$, wat $1050 \text{ A} \times 30 = 31.5 \text{ kW}$ aan de generator onttrekt. Veel meer dan nodig is.

Een aantrekkelijke bijkomende eigenschap van de Multi's is dat zij **de belasting van de generator per fase automatisch in balans brengen**: de Multi's nemen de het hoogste vermogen op van de fase(n) die anders de laagste belasting zouden hebben.

Een oplossing om de walstroom te reduceren is alweer het DC-concept. De dagelijkse energie van 240 kWh laat zich vertalen naar $(240 \text{ kWh} / 24 \text{ h}) / 24 \text{ V} = 416 \text{ A}$ bij 24 V, die kan worden geleverd door 6 acculaders van 100 A. De benodigde walstroom is dan 18 kW (32 A driefasen).

Beperking van de walstroom tot 18 kW kan ook door de Multi's met *PowerAssist* als walstroom booster te gebruiken, maar dan is frequentieconversie niet mogelijk.

Door een accu van 6000 Ah, 15 Multi's met *PowerAssist* en 6 acculaders van 100 A aan het systeem toe te voegen, kunnen we:

- 2 generatorvrije periodes per dag van in totaal 16 uur introduceren
- het vermogen van de generator terugbrengen van 50 kW (3-fasen) naar 40 kW (3-fasen)
- de benodigde walstroom reduceren van 50 kW (3-fasen 75 A) naar 20 kW (3-fasen 32 A)
- de frequentieomvormer van 50 kW voor aansluiting op 60 Hz walstroom elimineren
- een ononderbroken stroomvoorziening aan boord realiseren;
- de redundantie van het systeem en daarmee de veiligheid aanzienlijk verhogen.

12.3.3. Toevoeging van een 8 kW AC "hulp" generator teneinde het aantal draaiuren van de grote generator en de benodigde accucapaciteit te verminderen

Op een groot schip kan een kleine generator zodanig geïnstalleerd worden dat hij onhoorbaar is.

- De accu capaciteit zou dan verlaagd kunnen worden tot ca. 2000 Ah.

- Deze (1-fase) generator kan samen met 3 van 9 Multi's een piekvermogen van $8 + 7.5 = 15.5 \text{ kW}$ leveren, terwijl op de 2 andere fases 3 Multi's 7.5 kW kunnen leveren.

12.4. Een vergelijking van de alternatieven voor een gemiddeld gebruik van 10 kW

Energie behoefte tot 240 kWh per etmaal (gemiddeld 10 kW)		
	40 kW generator met 9 Multi's en <i>PowerAssist</i> . 2000 Ah service accu 8 kW hulpset.	AC-concept
Generatoren		
Vermogen	1 x 40 kW + 1 x 8 kW	1 x 50 kW + 1 x 10 kW
Draai-uren per etmaal	1 x 4 uur + 1 x 20 uur	1 x 10 uur
		1 x 14 uur
Verbruik per etmaal	95 liter	120 liter
Gewicht	800 kg	1200 kg
Accu		
Capaciteit	2000 Ah	400 Ah
Gewicht	2000 kg	400 kg
Walstroom	18 kW	50 kW
Nominaal vermogen	3 x 32 A	3 x 100 A
Gewicht van de autotransformer		n.v.t.
Gewicht van de frequentieomvormer van 50 kW	Niet nodig	1300 kg
Omvormer		
Vermogen	37.5 kW (15 Multi's)	6 kW
Gewicht	270 kg	54 kg
Acculaders		
Stroom	600 A	75 A
Gewicht	80 kg	10 kg
Totaal gewicht	3000 kg	2964 kg
2 weken brandstofverbruik (zie noot)	1330 liter	1680 liter
Totaal gewicht incl. Brandstof voor 2 weken	4017 kg	4375 kg

Uit de tabel blijkt het volgende:

De belangrijkste les is dat met 240 kWh elektrische energie per dag, de grens van de nieuwe componenten en concepten die in dit boek worden gepresenteerd is bereikt.

De accu die nodig is om *PowerAssist* en het DC-concept toe te kunnen passen is erg zwaar en duur.

Alleen als een generatorvrije periode noodzakelijk is, of als de benodigde energie meestal veel minder dan 240 kWh per dag is, zijn *PowerAssist* of het DC-concept aantrekkelijke opties.

13. CONCLUSIE

13.1. Het elektriciteitsverbruik aan boord

- Op kleine schepen zijn de koelkast en de vriezer vaak de belangrijkste verbruikers. Investering in goede isolatie en een goed, watergekoeld koelsysteem kan de benodigde accucapaciteit en oplaadtijd drastisch verminderen.
- Ook kleine airconditioning systemen kunnen ongelofelijk inefficiënt zijn.
- Het energieverbruik van continue en langdurige verbruikers (voornamelijk navigatie- en koelapparatuur) wordt vaak onderschat.
- Het energieverbruik van kortstondige verbruikers (magnetron, elektrische kookplaat, wasmachine, pompen, winches) wordt vaak overschat.

13.2. Energie opwekken

- De eerste stap naar de beschikbaarheid van meer energie aan boord is installatie van een tweede of grotere dynamo en verhoging van de accucapaciteit tot tenminste 3 keer de laadstroom van de dynamo (laadstroom maximaal $C / 3$). Een kleinere accu kan de beschikbare laadstroom niet absorberen.
- Bij het ontwerpen van het elektrische systeem moet om te beginnen de benodigde elektrische energie per etmaal bepaald worden.
- Een van de problemen die vaak over het hoofd wordt gezien bij het installeren van een dieselgenerator aan boord is beperkte walstroom. Vaak kan de generator veel meer vermogen leveren dan de walaansluiting, met als gevolg dat ook in de haven de generator gestart moet worden om te wassen of te koken.

13.3. Het DC-concept

- In het DC-concept is de accu het hart van het systeem. Op de accu zijn enerzijds de energie bronnen en anderzijds de verbruikers aangesloten. De accu levert extra energie als de vraag groter is dan het aanbod en absorbeert energie als het aanbod groter is dan de vraag. Maw: de accu doet dienst als "peak shaver".
- Het DC-concept maakt het mogelijk om, ondanks de beperkingen van de walaansluiting of een kleine dieselgenerator, toch onbeperkt te beschikken over alle moderne huishoudelijke apparatuur.
- Het DC-concept doet tevens dienst als 50 / 60 Hz frequentieomvormer.

13.4. *PowerAssist*: het accuondersteunde AC-concept

- Evenals bij het DC-concept, maakt *PowerAssist* gebruik van een accu als peak shaver, maar hier is de verbinding tussen leveranciers en verbruikers wisselspanning in plaats van gelijkspanning. Eén of meer MultiPlus omvormer/acculader combinaties die parallel aan een generator of de walstroom werken leveren extra vermogen wanneer de vraag groter is dan het aanbod en absorberen vermogen om de accu's op te laden wanneer het aanbod groter is dan de vraag.
- Evenals het DC-concept maakt *PowerAssist* het mogelijk om, ondanks de beperkingen van de walaansluiting of een kleine dieselgenerator, toch onbeperkt te beschikken over alle moderne huishoudelijke apparatuur.
- Evenals het DC-concept bespaart *PowerAssist* ruimte en gewicht. Daarnaast zal de gemiddelde belasting van de generator veel hoger zijn. Dit verlengt de levensduur en vermindert het onderhoud en het brandstofverbruik.
- *PowerAssist* is niet geschikt voor frequentieconversie. Maximale flexibiliteit wordt verkregen door gelijkrichters aan het systeem toe te voegen en het DC-concept toe te passen wanneer men op walstroom is aangesloten.

De serviceaccu

-De bruikbare capaciteit van de serviceaccu is ten hoogste 50 % van de nominale capaciteit. Dit komt doordat een accu niet te vaak tot minder dan 30 % van de nominale capaciteit mag worden ontladen en vaak niet tot meer dan 80 % wordt geladen.

-Op grotere jachten, uitgerust met dieselgenerator en een flinke serviceaccu tbv een generatorvrije periode, kan een kleine en onhoorbare (DC) generator worden gebruikt om de omvang en het gewicht van de accu te verkleinen.

Index

aanloopstroom driefasemotor, 36

AC-concept, 39, 58, 66

accu

absorptieladen, 22

absorptietijd, 26

afmetingen, 14

AGM, 11

boegschroefaccu, 27, 29

buisjesplaat, 11

bulkladen, 22

capaciteit, 54, 59, 63

capaciteit en ontladingsduur, 14

corrosie, 10, 23

cyclisch gebruik, 16

diffusie, 10

diffusieproces, 22

druppellaadspanning, 26

druppelladen, 23

effect van de ontladingsduur op de capaciteit, 20

egaliseringslading, 17

egaliseren, 24

elektrolyt, 19

energieverbruik, 20

floatladen, 23

gasontwikkeling, 11, 17, 23

gassen, 23

gasspanning, 19

gel, 11

gesloten, 11

gewicht, 14

kosten, 13

laadrendement, 20

laadspanning, 26

laden, 22

loodantimoon, 11

loodcalcium, 11

massaverlies, 10

ontladingstijd, 14

open, 11

opgerolde cel, 11, 23

snelle ontlading, 20

soortelijke massa, 19

spiral cell, 11

startaccu, 27, 29

stratificatie, 11, 17

sulfateren, 16

sulfatering, 10, 17

te weinig lading, 17

temperatuur, 15, 17

temperatuurcompensatie, 25

teveel laden, 17

thermal runaway, 25

tractie, 11

vlakke plaat, 11

VLRA, 23

VRLA, 11

water / gas per Ah, 24

zelfontlading, 18

accucapaciteit

bruikbare capaciteit, 42

capaciteit, 42

acculaden

absorptietijd, 26

druppellaadspanning, 26

teveel laden, 26

acculader

BatterySafe functie, 30

BatteryStorage functie, 30

acculaders, 30

accumonitor, 19

accuscheider, 29

airconditioning, 34, 47

BatterySafe functie, 30

BatteryStorage functie, 30

Coefficient of Performance, 33

DC concept, 38

DC generator, 38

DC-concept, 44, 55

DC-generator, 56

dieselgenerator, 53, 54

rendement, 56

duikcompressor, 36

dynamo, 47

motor-uren, 47

rendement, 48

elektrische kookplaat, 35, 52

energie, 32

dieselolie, 14

tot 14 kWh per etmaal, 50

tot 240 kWh per etmaal, 63

tot 4 kWh per etmaal, 45

tot 48 kWh per etmaal, 58

water, 14

energieverbruik

airconditioning, 34, 47

ankerlier, 35

boegschroef, 35

duikcompressor, 36

elektrische kookplaat, 35, 52

elektrische lier, 35

koelkast, 33

magnetron, 47

vaatwasmachine, 52

vriezer, 33

wasmachine, 35, 52

waterkoker, 52

watermaker, 47

frequentie omvormer, 54

frequentieregelaar, 36

generatorvrije periode, 39

koeling, 32

koelkast, 33

koken, 35

magnetron, 47

meertrapsregelaar, 29

microprocessor gestuurde accuscheider, 29

Multi, 9, 39, 54

PowerControl, 39

MultiPlus

PowerAssist, 39

omvormer

parallelaansluiting, 39

parallelschakelbaar, 9

Peukert, 20

PowerAssist, 9, 40, 55, 60, 66

PowerControl, 9, 39, 55, 59

Prestatiecoëfficiënt, 33

rendement

dieselgenerator, 56

dynamo, 48

soortelijke warmte, 34

vaatwasmachine, 35, 52

variabele frequentieaanrijving, 36

vermogen, 32

vriezer, 33

walstroom, 41, 43, 48

DC-concept, 44
frequentieomvormer, 44
reduceren piekvermogen, 43
warmtepomp, 33
wasmachine, 35, 52
watergenerator, 48

watermaker, 47
wind-energie, 48
wisselstroomdynamo, 28
Zonne-energie, 48
zuurweger, 19