

E8



STUDIECENTRUM VOOR KERNENERGIE

**C
E
N
T
R
E**

**D'
E
T
U
D
E**

**D
E**

**L'
E
N
E
R
G
I
E**

**N
U
C
L
E
A
I
R
E**

STOCKAGE VAN ELEKTRISCHE ENERGIE

L.H. BAETSLE

Januari 1980

STOCKAGE VAN ELEKTRISCHE ENERGIE

L.H. BAETSLE

Januari 1980

BLG 531

L.H. BAETSLE
BLG 531 (Jan. 1980)

STOCKAGE VAN ELEKTRISCHE ENERGIE

Samenvatting. - Het artikel geeft een zeer kort overzicht van de elektriciteitslevering in functie van het type van centrale en van het tijdstip waarop de energie ter beschikking gesteld wordt. De hoeveelheid «buiten piek» vermogen die te verwachten is in de toekomst hangt af van de samenstelling van het elektriciteitspark waarbij 50 % nucleaire elektriciteit een drempel is waarboven buiten piek vermogen op seizoenbasis dient opgeslagen.

De pompcentrales vertegenwoordigen de meest economische elektriciteitsopstapelingswijze doch deze techniek is alleen geldig voor korte duur (dag en weekend overschotten). Van de in ontwikkeling zijnde systemen zullen gemengd pomp-perslucht opslag en perslucht opslag alleen, de eerste systemen zijn die de pompcentrales zullen opvolgen vooral in zones met weinig reliëf.

Opslag in batterijen is alleen uitvoerbaar voor kleine vermogens en het gebruik van water- of chloorzuur-elektrolyse is een toekomsttoepassing die in aanmerking komt voor seizoenstockage.

De meer futuristische oplossingen zoals mechanische opslag in vliegwielen en elektromagnetische opslag in diepgekoelde magneten komen niet in aanmerking voor de volgende twee decennia.

L.H. BAETSLE
BLG 531 (Jan. 1980)

STOCKAGE VAN ELEKTRISCHE ENERGIE

Résumé. - Cet article donne un bref aperçu de la structure de distribution de l'électricité en fonction du type de centrale et du temps auquel l'énergie est mise à disposition. La quantité d'électricité «en heures creuses» qui peut être attendue à moyen terme dépend de la composition du parc d'électricité. Dès que le seuil de 50 % d'électricité nucléaire est atteint, du courant en heures creuses doit être stocké sur base saisonnière.

Les centrales à pompage hydraulique constituent le mode de stockage d'électricité le plus économique mais cette technique n'est valable que pour de courtes durées (journalier, weekend). Des systèmes en développement, le pompage mixte hydraulique ou comprimé et le stockage d'air comprimé seul, deviendront les premiers systèmes qui suivront les centrales à pompage hydraulique surtout dans des zones à faible relief.

Le stockage d'électricité dans des batteries n'est faisable que pour les petites puissances et l'utilisation d'électrolyse d'eau ou d'acide chlorhydrique est appelé à jouer un rôle d'avenir pour le stockage saisonnier.

Les solutions plus futuristes comme le stockage mécanique dans des gyroscopes et le stockage électromagnétique dans des aimants à température cryogénique n'entrent pas en ligne de compte avant les deux décennies suivantes.

L.H. BAETSLE
BLG 531 (Jan. 1980)

STOCKAGE VAN ELEKTRISCHE ENERGIE

Summary. - The report gives a short review of the electric power distribution as a function of the type of power station and the time at which the electricity is delivered. The quantity of «off-peak electricity» to be expected in the future depends on the composition of the electricity machine park, 50 % nuclear electricity being a threshold above which off-peak power has to be stored on a seasonal basis.

Hydraulic power stations constitute the most economical method for electricity storage; however, it is only a short-term solution (day, week-end). Among the systems under development, only mixed pump-compressed air storage and compressed air storage solely, will be the first to succeed to hydraulic power stations, particularly in low-relief regions.

Electricity storage in batteries can only be realized for low powers and the use of water or chloric acid electrolysis is a future application which can play a rôle for seasonal storage.

More futuristic solutions such as mechanical storage in gyroscopes and electromagnetic storage in cryogenic magnets, will not enter the running before the next two decades.

STOCKAGE VAN ELEKTRISCHE ENERGIE

L.H. Baetslé

Studiecentrum voor Kernenergie

MOL

1. INLEIDING

De produktie van energie verloopt meestal monotoon waarbij elke eenheid het meest rendabel is wanneer ze kontinu bedreven wordt op haar maximaal vermogen. Naargelang de omvang van de produktie eenheden stijgt is de aan- en afkoppeling ervan, een als maar duurder proces. Het verbruik van energie is een cyclisch proces welk de menselijke aktiviteit en de seizoen situaties van zeer dichtbij volgt. Als wij de huidige toestand onderzoeken dan is die het meest karakteristiek in de elektriciteitsvoorziening. Een typisch dagelijkse beladingskurve van een elektriciteitscentrale wordt weergegeven in figuur 1 waaruit af te leiden valt dat van middernacht tot de vroege morgen de vraag naar elektrische energie tot 55 % van het dagelijks maximum daalt [1]. Elk weekeinde daalt de vraag tot rond en bij het nacht minimum zoals aangetoond in Fig.2. Over gans het jaar verloopt de beladingskurve volgens een zeer eenvoudig patroon waaruit de types van toeleveringscentrales kunnen worden afgeleid. Fig. 3 toont aan dat een zeer kleine bijdrage (minder dan 1000 uren per jaar) tot het totaal energieverbruik geleverd wordt door 25 % van het [2] [3] geïnstalleerd vermogen. Een tweede schijf van 25 % is slechts 4000 uren per jaar in bedrijf en tenslotte de basis last welke rug weg 50 % van het totaal vermogen inneemt is het ganse jaar in bedrijf.

Wanneer wij onze aandacht richten op een toekomst situatie dan is het duidelijk dat enerzijds schaalvergroting onherroepelijk doorgaat en dat anderzijds cyclische energie produktie methodes zullen komen opdagen welke allen meer en meer beroep zullen doen op de opslag van energie.

Een verhoogd gebruik aan kerncentrales, tot boven het basis last percentage (50 %) veronderstelt dat gedurende een niet onaanzienlijk deel van het jaar bijvoorbeeld de zomer periode de geproduceerde elektriciteit kan worden omgezet in een opslagbare vorm.

Indien termonukleaire fusie energie in het begin van de 21ste eeuw tot een praktische en industriële realisatie zou leiden dan mag verwacht worden dat de produktie eenheden tienmaal zo groot zullen zijn als de huidige kerncentrales. Dit wil dus zeggen dat kernfusie centrales van dezelfde grootte zullen zijn als het totaal huidig belgisch geïnstalleerd vermogen. Het is vanzelfsprekend dat dergelijke giganten geen vermogens fluktuaties meer kunnen ondergaan en dus moeten gekoppeld worden aan een eenheid voor produktie van stapelbare energie.

Zonne-energie omgezet in elektrische stroom is slechts economisch bruikbaar wanneer een opslagmogelijkheid geschakeld wordt tussen de produktieeenheid en de verbruiker. Andere alternatieve energievormen zoals wind-energie en golfslag-energie zijn waardeloos als ze niet opgeslagen worden in een of andere energie drager.

Uit al deze overwegingen mogen wij dus afleiden dat de opstaling van energie en meer in het bijzonder van elektrische energie een toenemende rol zal gaan spelen in de energie ekonomie.

2. HUIDIGE STRUKTUUR VAN DE ELEKTRICITEITSBEVOORRADING

De opsplitsing in bevoorradingstype en in produktie uitrusting voor elektrische energie heeft de laatste tijd de aandacht van de overheden en van de elektriciteitssektor gaande te houden [4] [5].

Uit tabel I ziet men duidelijk hoe gediversifieerd de primaire energie bronnen zijn met als bijzonderste karakteristiek de afname van het olie en aardgas gebruik in het voordeel van de kernenergie. Rekening houdend met het uitrustingsplan 1977-1982 van de elektriciteitssektor zal men tot volgende opdeling komen in 1983

| | | % |
|------------------------|-----------|-------|
| Kerncentrales | 5246 MWe | 34.3 |
| Konventionele centrale | 9592 MWe | 62.9 |
| Hydraulische | 63 MWe | 0.4 |
| Pompcentrales | 369 MWe | 2.4 |
| | <hr/> | <hr/> |
| | 15270 MWe | 100 |

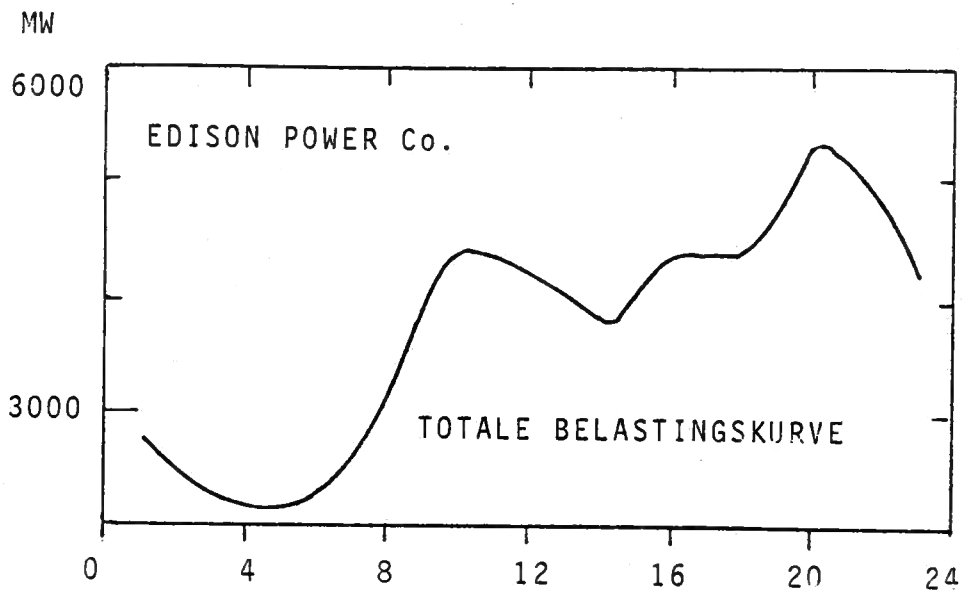


FIG. 1 TOTALE VRAAG NAAR ELEKTRISCH VERMOGEN

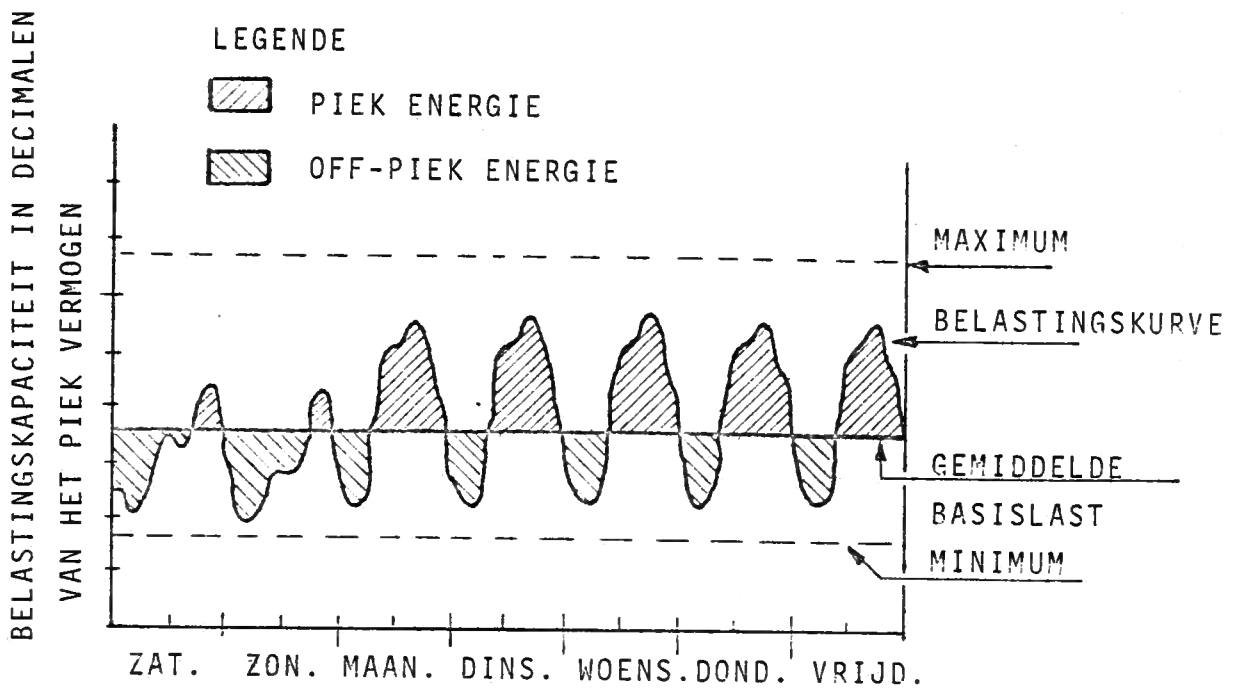


FIG. 2 OFF-PIEK EN PIEK ENERGIE

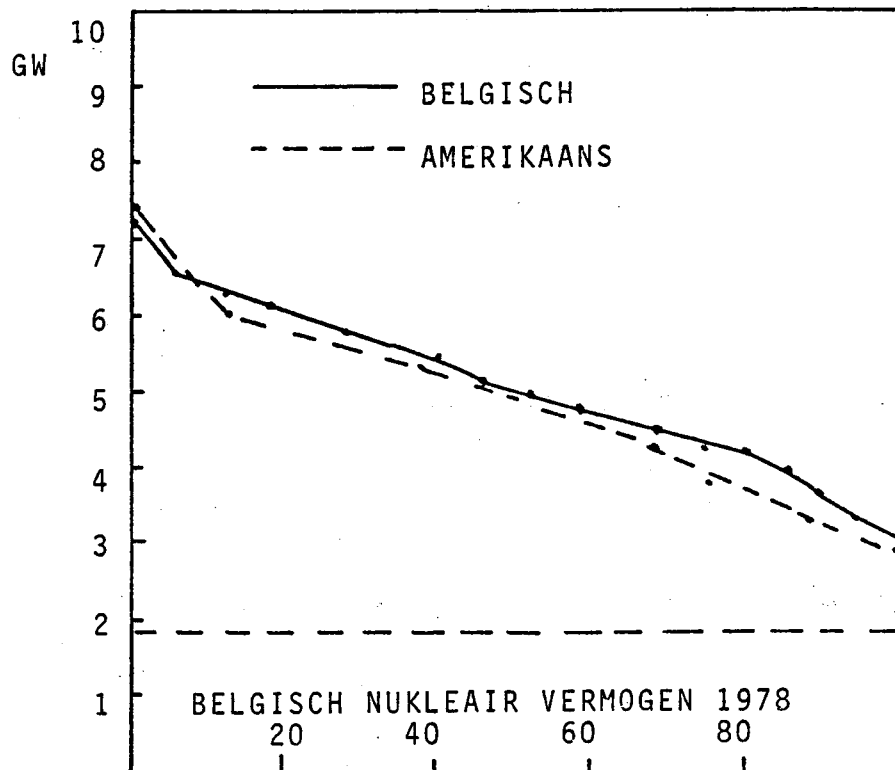


FIG. 3 BELASTINGSKURVE VAN
ELEKTRICITEITNETTEN

Het is duidelijk dat er zich geen belangrijk stockage probleem (4 % in 1976) stelt omdat 34 % kernenergie nog volledig in de basis last is opgenomen.

Voor een verdere toekomst zal zich dit probleem stellen indien het prijsverschil tussen de produktie van elektriciteit uit kerncentrales en uit konventionele centrales voldoende belangrijk is m.a.w. indien de fossiele brandstoffen sneller in prijs toenemen dan de nukleaire energie dan zal onvermijdelijk een hoger procent aan basis last kerncentrales worden ingebouwd in het net. Bij 30 % basis last kernenergie centrales is 3 % van het geïnstalleerd vermogen zo genoemde "off peak" elektriciteit, bij 50 % kernenergie bedraagt dit ongeveer 7 % van de totaal geproduceerde energie. Om dit in cijfers vast te leggen betekent dit respectievelijk $1,35 \cdot 10^9$ kWh en $3,15 \cdot 10^9$ kWh per jaar per 10 000 MWe. De installaties die hieraan moeten beantwoorden zijn dus eveneens zeer omvangrijk en niet elk type is hiervoor geschikt.

3. TOEKOMSTIGE EVOLUTIE IN DE ENERGIESEKTOR

Zoals reeds in de inleiding vermeld kan verwacht worden dat vanaf het einde van deze eeuw de alternatieve energieën een niet onbeduidende rol zullen spelen. Elk van de genoemde vormen: kernfusie voor de grootschalige toepassing; zonne-energie, golfslag- en wind-energie voor de kleinschalige toepassingen; zullen moeten geïntegreerd worden in een net met aanzienlijke energie opstapelingsfaciliteiten.

Een kernfusie reaktor van 10 tot 20 GWe zou dus in de hierboven omschreven optiek vergezeld gaan van een elektriciteitsopstapel eenheid van $3 \cdot 10^9$ tot $6,3 \cdot 10^9$ kWh.

Elke zonne-energie batterij en aanverwante installaties moet vergezeld zijn van een nominaal even grote energiestapelings eenheid als de produktie eenheid zelf. Er zijn echter moeilijk hiervoor cijfers aan te geven omdat betrouwbare gegevens ontbreken omtrent prognoses van foto-voltatische elektriciteitsproduktie in de landen van NW Europa.

In de alternatieve energieën zal het marktaandeel van deze buffer eenheden dus in principe even belangrijk zijn als die van de primaire produktie eenheden zelf.

Tenslotte dient nog de aandacht getrokken op een derde type van activiteit in deze sektor nl. de substitutie van fossiele brandstoffen door nieuwe vektoren hierbij is voornamelijk de produktie van waterstof te vermelden welke in belangrijke mate het aardgas zou kunnen vervangen en als grondstof zou kunnen dienen voor syntetische vloeibare brandstoffen zoals methanol. Als men zich een toekomst scenario inbeeldt van de energie distributie dan wordt het algemeen aangenomen dat het aandeel van elektriciteit zal stijgen en dat waterstof eerst als secundaire vektor zou kunnen geproduceerd worden met een mogelijk overschot aan elektriciteit. Deze eerste fase zou inhouden dat hierdoor aardgas bespaard wordt in de chemische sektor.

In een tweede fase, wanneer de prijs van aardgas verdubbeld is t.o.v. het huidig prijs peil is het denkbaar dat men er economisch voordeel bij doet om het percentage kernenergie op te drijven en dus de hoeveelheid off peak elektriciteit te verhogen. Hierdoor kan een secundaire energie vektor, naast de maximale benutting van elektriciteit, een belangrijke rol spelen in de energie sektor.

Hoeveelheid overschot en piek elektriciteit.

Wanneer men het belastingsdiagramma van een elektrisch net over een gans jaar volgt dan kan algemeen aangenomen worden dat er een symmetrische verdeling bestaat tussen elektriciteit nodig voor piek belasting en overschot elektriciteit in periodes van gering verbruik (zie Fig. 4). Een dergelijke cyclische structuur van het verbruik is een ideale basis voor het aanleggen van een stockage pool welke als buffer zou dienen tussen de produktie en de behoeften van het net.

Hoe groter de verhouding piek tot gemiddelde hoe groter het ongebruikt kapitaals-investeringsdeel. Een analyse van Edison Power Co toonde aan dat de beladingsfaktor van de industrie het hoogst is met 83 %, gevolgd door de handelssektor met 59 % waarvan de piek gelegen is tussen 10 en 20 h en tenslotte de residentiele sektor met 40 % waarvan twee pieken rond de middag en rond 20 h (zie Fig. 5).

Uit een recente studie blijkt dat op dag basis 0.2 % overschot dient weggewerkt, op week basis bedraagt het 2 % en op jaar basis 20 tot 25 %. Een komputer studie toonde aan dat slechts een klein deel daarvan kan aangewend worden (zie Fig. 6).

Een eerste poging werd ondernomen om de belastingskurve af te platten door de residentiele sektor met tarief aanpassingen te beïnvloeden bijv. grote verbruikers van stroom 's nachts te laten draaien (accumulatie warmte, wasmachines, drogers...) doch hieraan zijn vanzelfsprekend grenzen daar het gedragpatroon van de mens zich niet laat aan banden leggen.

Daarom werd reeds een tiental jaar geleden aan centrale middelen om elektriciteit op te slaan gedacht.

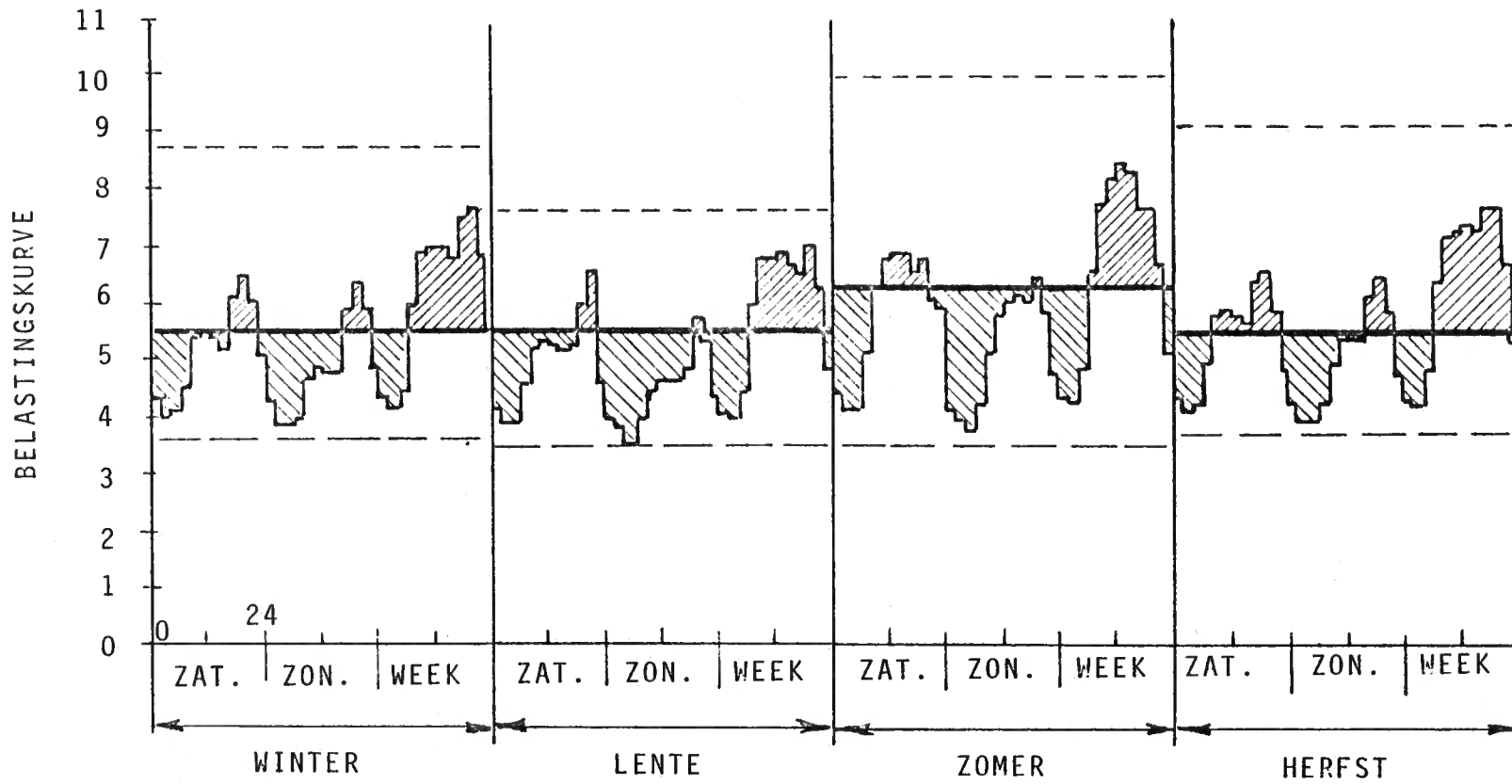
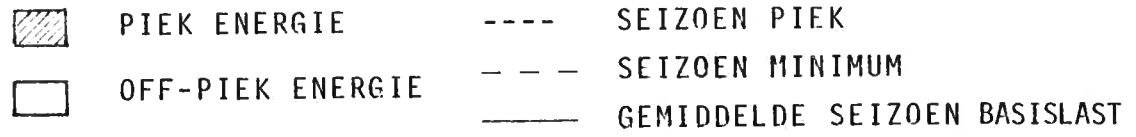


FIG. 4 JAARVERDELING VAN OFF-PIEK EN PIEK ENERGIE

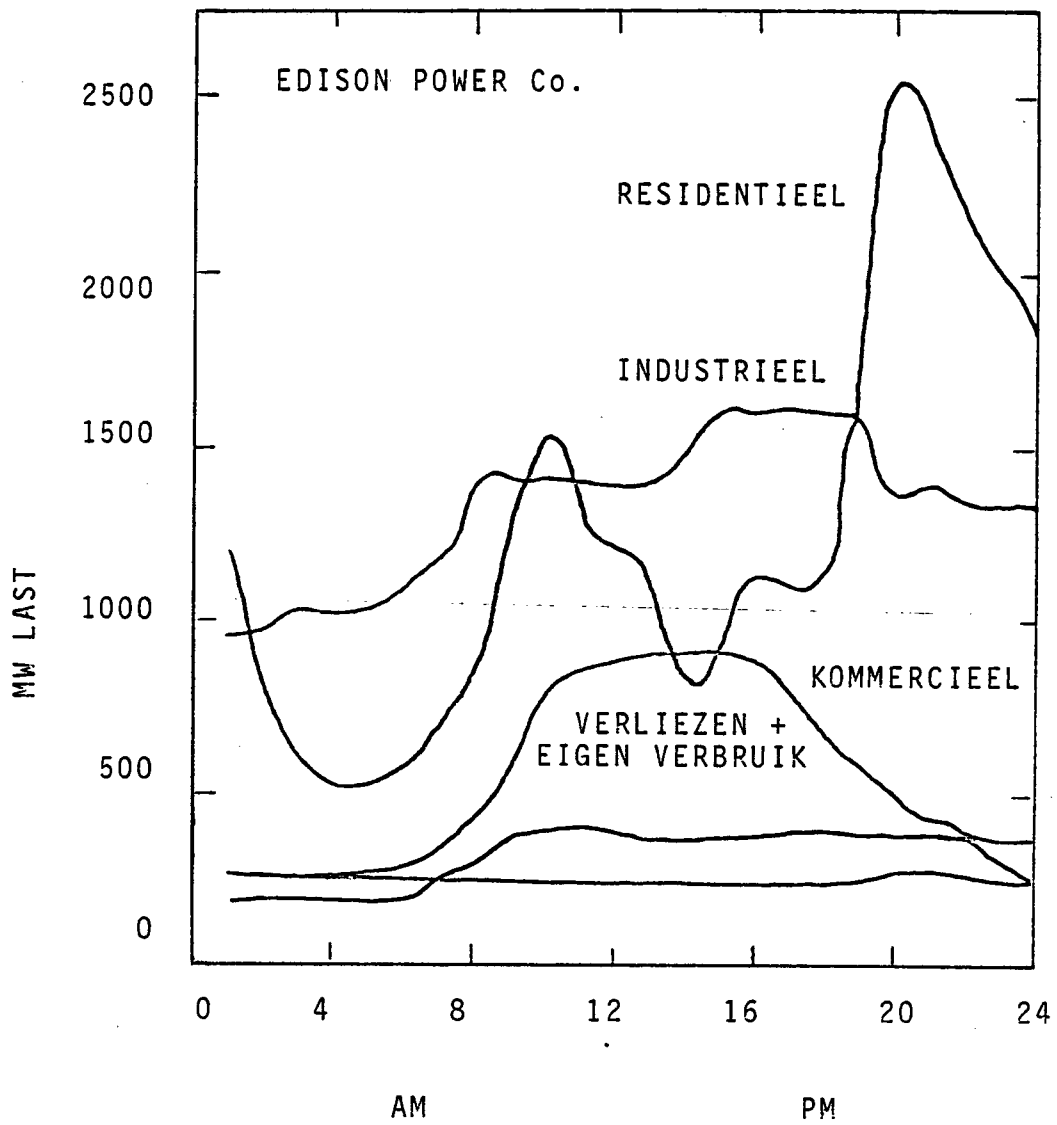


FIG. 5 ELEKTRICITEITSVRAAG OPGEDEELD IN DE DIVERSE SEKTOREN

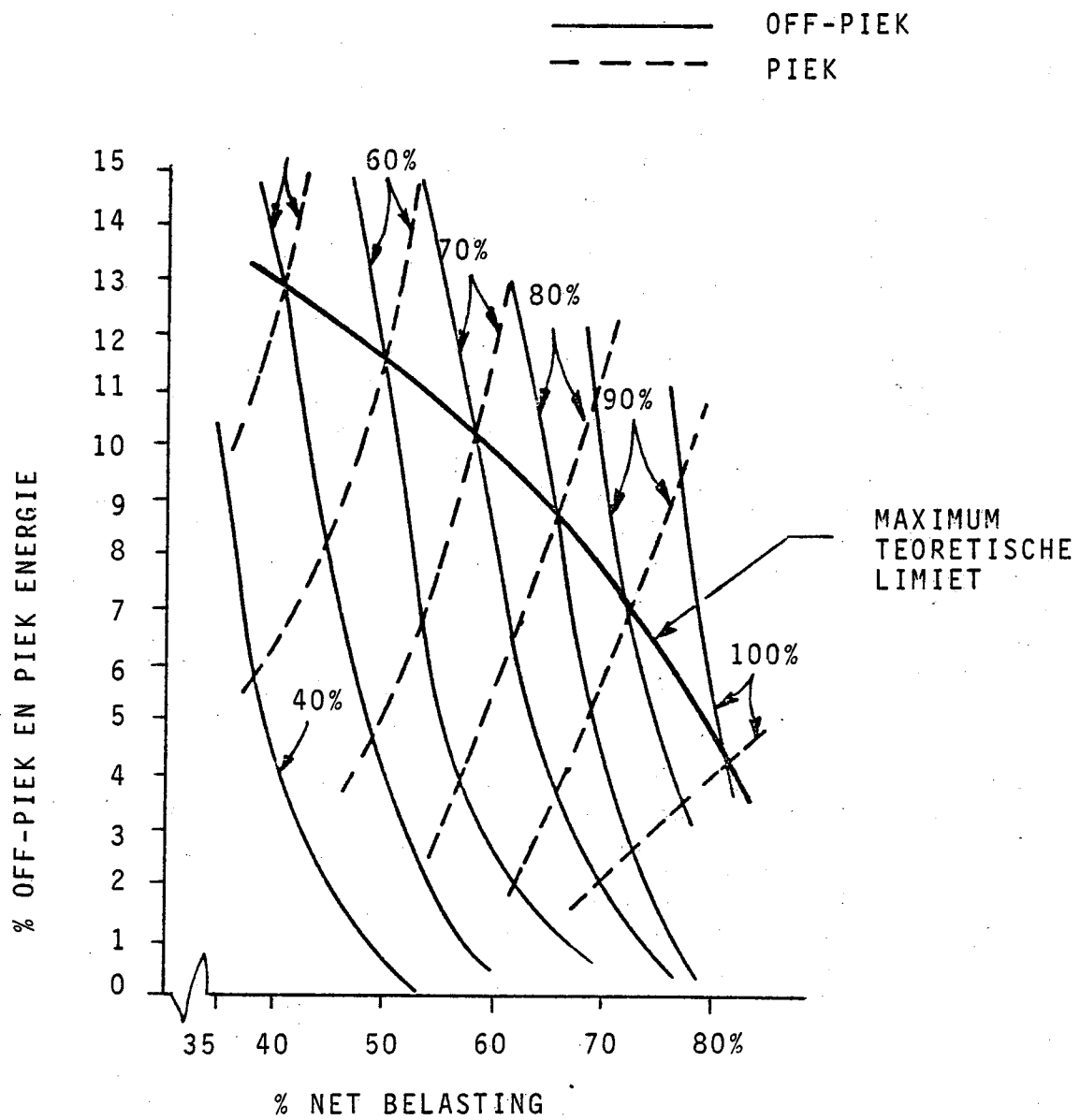


FIG. 6 TEORETISCHE GRAFIEK MET AANDUIDING VAN HOEVEELHEDEN OFF-PIEK EN PIEKENERGIE

4. EVALUATIE VAN SYSTEMEN VOOR OPSLAG VAN ELEKTRICITEIT

De volgende mogelijkheden voor grootscheepse opslag van elektriciteit worden op dit ogenblik bestudeerd :

a) Mekanische opslag systemen

- pompcentrales
- perslucht opslag
- warmte opslag
- vliegwielen
- bovengronds
- ondergronds
- met verbranding turbines
- gekoppeld aan pompcentrales
- ondergrondse opslag in waterlagen, mijnen, enz...
- water onder druk
- olietanks

b) Scheikundige opslagsystemen

- opslag in batterijen
 - lood H_2SO_4
 - LiFeS
 - Na-S
 - Na-Cl
 - Zn-Cl
- opslag als waterstof

c) Elektromagnetische opslagsystemen

- opslag in supergeleidende magneten

In elk van deze voorgestelde systemen zijn er die op korte termijn een toepassingsgebied zullen vinden (of reeds hebben), zijn er middellange termijn toepassingen en tenslotte lange termijn systemen.

- operationele systemen: pompcentrales - bovengronds
perslucht opslag
- korte termijn toepassingen :
 - (1985) pompcentrales ondergrond
 - natte stoom
 - olie
 - lood - zwavelzuur batterijen
- middellange termijn : waterstof
geavanceerde batterijen
vliegwielen
- lange termijn : super geleidende magneten

Tabel II geeft een volledig overzicht van de technische-ekonomische karakteristieken zoals die worden opgesteld door het Electric Power Research Institute [3]. Elk van deze beschouwde systemen hebben hun eigen optimum toepassingsgebied en worden hierna in meer detail besproken.

4.1. Pompcentrales

Een pompcentrale is een eenheid welke bestaat uit twee grote hydraulische bekkens één op enkele honderden meter hoog verbonden door een leiding waarop een pomp en een turbine zijn aangesloten.

Bij overmaat van elektriciteit wordt de elektriciteit gebruikt om water van het lager naar het hoger bekken te pompen bij tekort aan stroom laat men het water zoals in een stuwdam doorheen een hydraulische turbine aflopen.

Er bestaan reeds heel wat pompcentrales in de wereld die aangelegd worden als het relief dit toelaat. In België werd in 1972 de centrale van Coo-Trois Ponts gebouwd [6] met een global vermogen van 450 MW, d.w.z. ongeveer 4 % van het totaal geïnstalleerd vermogen. Het niveau verschil varieert tussen 240 en 275 m en de vulling van het boven bekken neemt 8h in beslag terwijl het leeglopen in 6h30 voltrokken is. Het energetisch rendement varieert in het algemeen tussen 66 en 78 % van de opgeslagen elektriciteit.

Het voordeel van de pompcentrale is rechtevenredig met de prijs van de brandstof en met het prijsverschil tussen de brandstof van de basiscentrales en die van de piekcentrales.

Hoe meer kerncentrales enerzijds en hoe hoger de prijs van fossiele brandstoffen anderzijds, hoe rendabeler de pompcentrales.

Een variatie van de klassieke bovengrondse centrale is de pompcentrale met ondergronds reservoir. Hierbij bevindt zich de pompturbine zaal in de ondergrond en het boven bekken op het grond niveau. De meest geschikte geologische formaties voor het aanleggen van zulke pompcentrales zijn de graniet-lagen, doch de kosten voor het aanleggen van grote ondergrondse bekkens is een economische hinderpaal. Daarom wordt gedacht aan een combinatie van waterkracht en perslucht centrale.

4.2. Pomp perslucht centrales

Fig. 7 toont het principe aan van een gekombineerde waterkracht-perslucht centrale. Tijdens piekuren loopt water van het bovenbekken door de turbine naar het ondergrondsreservoir en simultaan wordt perslucht isobaar afgelaten aan een gasturbine daar water de afgelaten lucht vervangt. Tijdens off-piek uren worden de richtingen omgekeerd zowel van het water als van de perslucht.

Het voordeel van deze combinatie ligt in het feit dat voor eenzelfde vermogen het volume van het ondergronds reservoir kleiner mag zijn. Het globaal energetisch rendement is echter hetzelfde als dat van pompcentrales.

4.3. Perslucht opslag

Het principe van de perslucht opslag centrale is weergegeven in Fig.8. Het net is aangesloten op een synchroon motor welke alternatief een kompressor (voor off piek) of een gasturbine generator (tijdens piekuren) aandrijft. Het lucht reservoir dient als stockage capaciteit waarbij de denivellatie geen belang heeft in tegenstelling met pompcentrales.

Als luchtkompressoren kan men axiale of centrifugale kompressoren aanwenden. Het netto energetisch rendement is de verhouding tussen de door het systeem hoeveelheid geproduceerde KWh en de in het systeem geïnjecteerde d.w.z. de compressie energie plus de brandstof van de turbine. Dit rendement varieert tussen 40 en 53 %.

Een van de grote problemen houdt echter verband met de temperatuursverhoging in het gas tijdens de samendrukking welke grote kosten meebrengt bij de bouw van een ondergronde perslucht reservoir. Indien men temperaturen van 400 °C zou kunnen tolereren in ondergrondse bekkens zou dit systeem aantrekkelijker zijn ofwel moet men de warmte apart opslaan in een regeneratieve warmte reservoir en de perslucht in een "koud" ondergronds bekken.

Typische operationele karakteristieken zijn :

- opslag bij 8 bar
- afluiddruk bij 7 bar
- opslag volume 7 m³/KWh kost 4500 A/7 m³

Het is duidelijk uit deze gegevens af te leiden dat de opslag volumina ontzaglijk zijn voor off-piek stockage.

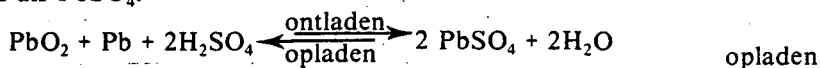
5. ELEKTROCHEMISCHE OPSLAG

Het type van elektriciteitsopslag waar het meeste onderzoek en ontwikkeling aan besteed werd is de elektrochemische opslag. De meest gekende en reeds op kleine schaal aangewende vorm is de batterij. Nieuwe ontwikkelingen op dit gebied hebben tot doel de KW/vermogen verhouding zo hoog mogelijk op te drijven.

De tweede vorm van elektrochemische opslag is de elektrolyse waarbij zowel elektrolyten als water in aanmerking komen. In deze vorm van opslag dienen grote volumina gassen hetzij opgeslagen, hetzij verbruikt worden. De elektrolyse van water is een speciaal geval van elektrochemische opslag waarbij waterstof en zuurstof als ontbindingsprodukten worden gevormd.

5.1. Opslag van elektriciteit in batterijen

Het meest bekende type van batterij is de lood-zwavelzuur batterij alom aanwezig in onze wagens waarbij elektrische stroom opgeslagen wordt onder vorm van Pb en PbO₂ en terug vrijgesteld wordt door oplossing van het lood als PbSO₄.



De capaciteit van de batterij wordt meestal uitgedrukt in Ampère-uur of in KWh. De voornaamste factoren die de capaciteit beïnvloeden zijn : ontladingsnelheid, temperatuur en eindspanning. Het globaal elektrisch rendement bedraagt 70 %.

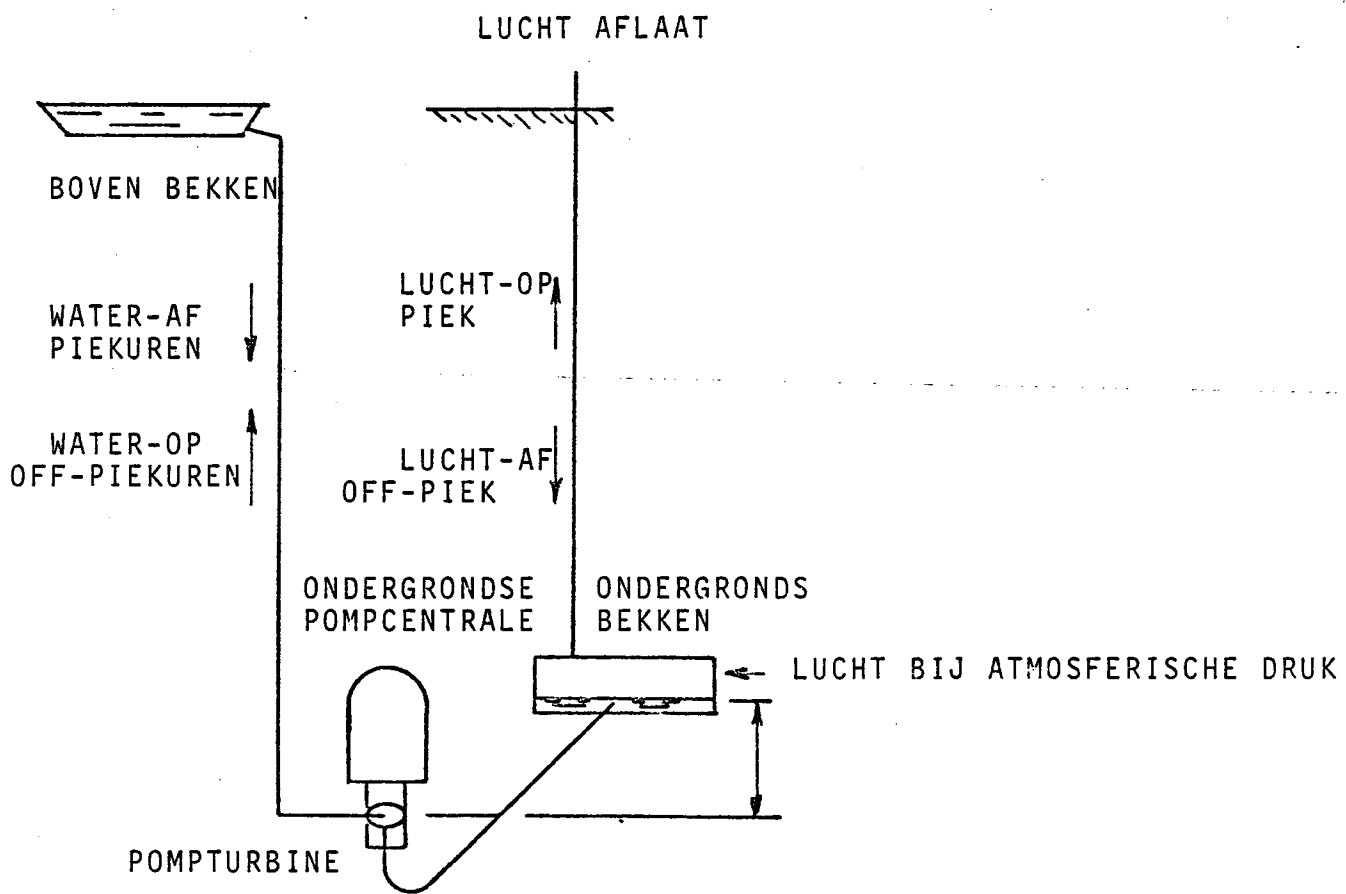


FIG. 7 ONDERGRONDSE POMPCENTRALE

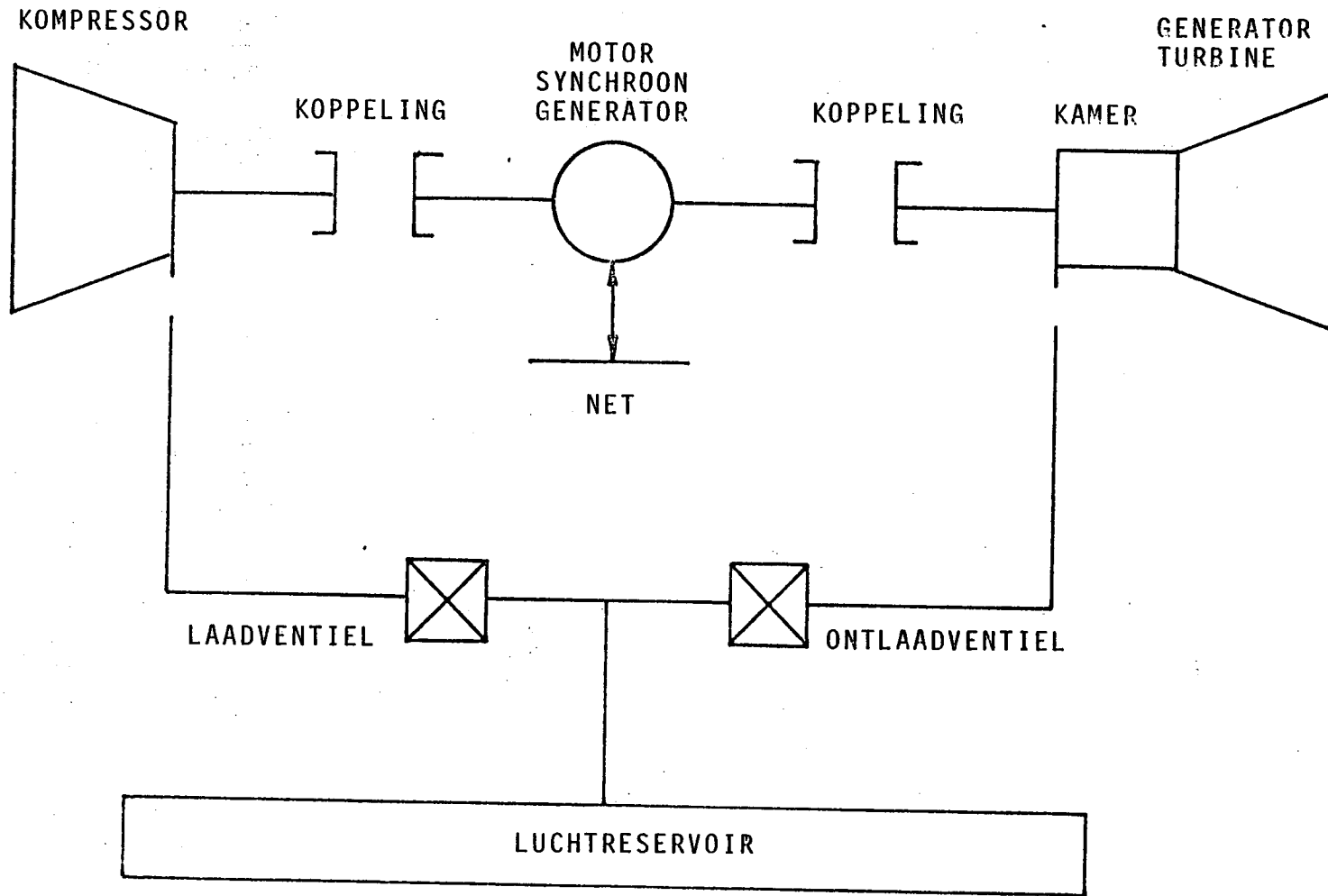


FIG. 8 PERSLUCHT ENERGIEOPSLAG

Voor speciale toepassingen (onderzee vermogen) worden reeds batterijen van 10 000 Ah vervaardigd doch deze batterij heeft het nadeel zeer zwaar te zijn en in de huidige context tamelijk duur.

Men kan zich terecht de vraag stellen of de wereld lood produktie voldoende zou zijn om aan een vraag voor net belastingskontrolle te voldoen. Zo wordt in de Verenigde Staten de helft van de totale lood produktie gebruikt voor batterij produktie en deze bedroeg in 1975 55 000 MWh wat zou kunnen overeenkomen met 550 net belastingskontrolle-eenheden van 100 MWh elk.

Tabel III geeft een overzicht van de samenstellingskosten voor twee lood batterij types, hierin valt op dat meer dan 60 % van de totale installatie kost per KWh besteed wordt aan de batterij zelf.

Tenslotte dient aangestipt dat één derde van de verbruikskosten per KWh te wijten is aan het lood van de batterijen die gepland worden voor een levensduur van 10 jaar. Meer geavanceerde batterijen worden intens bestudeerd in een aantal laboratoria.

- Natrium-zwavel batterij

In deze batterij wordt vloeibaar natrium afgescheiden van een zwavelbad door een Na ionen geleidend keramisch membraan. De batterij werkt in principe bij 300 tot 350 °C

- Natrium-chloride batterij

Steunt op hetzelfde principe als de vorige doch zwavel wordt hier vervangen door natriumchloro-aluminaat waaraan antimoon trichloride wordt toegevoegd.

- Lithium-ijzersulfide batterij

In deze batterij wordt de positieve elektrode gevuld met een legering Li-Al en de negatieve met FeS.

Een overzicht van de technische karakteristieken van deze geavanceerde batterijen t.o.v. de lood-batterij wordt gegeven in tabel IV. Ter vergelijking kan hier vermeld worden dat een 100 MWh batterij 3500 ton zou wegen voor het lood types en 800 ton voor Li-Al-FeS systeem.

5.2. Opslag van elektriciteit in chemicaliën [7] [8] [9]

De meest bekende elektriciteitsverbruikers de Al produktie welke 16 750 KWh verbruikt per ton aluminium doch de produktie ervan wordt onekonomisch wanneer geen zeer goedkope (waterkracht) elektriciteit ter beschikking staat.

Andere elektriciteitsintensieve sectoren zijn de elektrochemische bedrijven voornamelijk de Na-Cl produktie en de koper raffinage. Hun geschiktheid om overtollige elektriciteit op te nemen is beperkt om technische (onderbreking van de produktie) en ekonomische redenen. (prijs van de elektriciteit t.o.v. de marktwaarde van het produkt).

De meest bekende vorm van elektriciteitsopslag is de produktie van waterstof door elektrolyse van water gekoppeld aan een luchtfraktioneringsbedrijf voor ammoniak fabrikage. Fig. 9 toont een principe schema van zulk een concept.

Voor een 1000 T/dag NH₃ fabriek zou aldus een elektriciteitsverbruik van 9.72 10⁶ KWh kunnen aangewend worden ter vervanging van 700 000 Nm³ aardgas dat nu als primaire energiebron wordt gebruikt.

Volgens deze Amerikaanse ekonomische gegevens van 1975 (zie tabel V) is deze produktie wijze nog dubbel zo duur als de gangbare procédé's. Het is echter te verwachten dat aardgas sneller in prijs zal stijgen dan de nukleaire elektriciteit en aldus dit schema rendabel zal maken in de tweede helft der tachtiger jaren.

De optimalisatie van deyse door verhoging van de stroom densiteit zal de bijdrage van de investeringskosten in de produktieprijzen van waterstof doen afnemen. Daarenboven is de aardgasprijs gestegen van 1.6 BF/Nm³ in 1973 tot meer dan 2 BF nu en verwacht men 4 BF rond 1985-1990. Wegens deze onrustbarende doch waarschijnlijke evolutie van de aardgasprijs zal de NH₃ industrie de eerste klient worden voor deze elektrolytische waterstof geproduceerd uit off-peak elektriciteit met geavanceerde elektrolyseurs.

Andere chemische vormen in dewelke H₂ kan worden omgezet zijn CH₃OH (methanol) en NH₂NH₂ (hydrazine). Methanol wordt echter gemakkelijker bereid uitgaande van waterstof voortkomend uit kolenvergassing. Het is dus weinig waarschijnlijk dat de elektriciteitssector hier zal tussen komen temeer daar ons land beschikt over grote reserves steenkolen die mettertijd moeilijker mekanisch zullen kunnen geextraheerd worden.

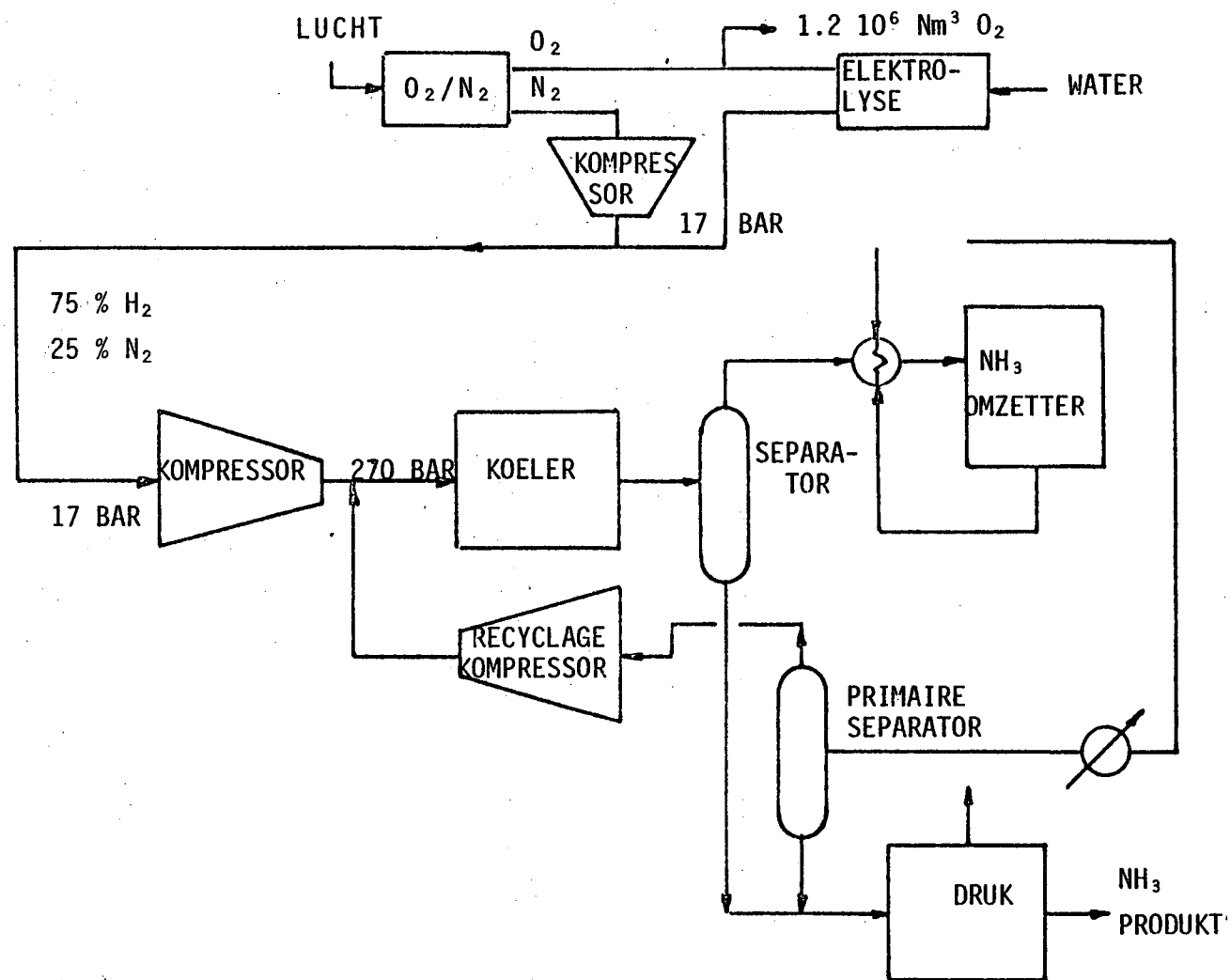


FIG. 9 GEINTEGREERD WATERELEKTROLYSE AMMONIAK PRODUKTIE SCHEMA

Een alternatief elektrochemisch opslagsysteem werd zeer recent door Amerikaanse onderzoekers voorgesteld [9]. Het gaat om een elektrolyse van HCl waarbij dit produkt geëlektrolyseerd wordt in H_2 en Cl_2 . Beide componenten worden apart opgeslagen en kunnen nadien opnieuw elektrochemisch gerecombineerd worden. Een vergelijking van de technische gegevens van beide systemen: het H_2-O_2 en het H_2-Cl_2 systeem, worden gegeven in tabel VI. In principe heeft het H_2-Cl_2 systeem een elektrochemisch voordeel daar het globaal rendement 80 % zou kunnen bereiken terwijl dat van de water elektrolyse gekoppeld aan een brandstofcel slechts 50 tot 60 % zou kunnen halen.

De klassieke water elektrolyse is echter een welgekende technologie terwijl de elektrolyse van HCl materiaal problemen kan stellen die onverwacht zijn. De stockage van het gevormde chloor is eveneens veel omslachtiger dan dat van O_2 dat eventueel zelfs als een afgas kan beschouwd worden en geen technische problemen van enige omvang scheppen.

Beide systemen maken echter wel een kans om in het toekomstig energie bestel een rol te spelen.

6. OPSLAG IN VliegWIELEN

Sedert geruime tijd worden vliegwielen gebruikt om pulsen met een zeer hoog vermogen te injecteren in deeltjes versnellers. Uit deze sektor van het nucleair onderzoek is een belangrijk onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma gegroeid dat als doel had het vliegwiel concept algemeen te introduceren in het gebied van de energie stockage. De meest geschikte materialen zijn die met een zeer grote treksterkte en een kleine dichtheid. Door de aanwending van glasvezel versterkte plastics is het nu in principe mogelijk energieën van de orde van 10 MWh gedurende een tiental uren op te slaan.

Volgens de huidige gegevens zou een vliegwiel investering $A 140$ per opgestapelde KWh kosten en dit cijfer zou om economisch attractief te zijn met een faktor vijf moeten verlaagd worden. Gezien dit niet verwacht wordt met de huidige bestaande materialen wordt vliegwiel-energie stockage als een lange termijn optie beschouwd welke alleen in aanmerking komt voor opslag gedurende enkele uren.

7. ELEKTROMAGNETISCHE OPSLAG IN SUPERGELEIDENDE MAGNETEN

Eveneens in de hoge energie fysika werden grote inspanningen gedaan om supergeleidende magnetische materialen te ontwikkelen die in principe een geïnduceerde elektrische stroom oneindig lang kunnen laten rondlopen daar er geen weerstandverliezen optreden. Onderzoekers van de Los Alamos laboratoria hebben pionierswerk verricht in deze sektor die nauw gekoppeld is aan de ontwikkeling van termonucleaire fusie reactoren [10]. De materialen die voor deze technologie in aanmerking komen zijn Nb_3Sn , Nb_3Al , $Nb_3(GeAl)$ en dergelijke die eerder zeldzaam te noemen zijn. De stroomdensiteit in deze geleiders kan tot 10^4 à 10^5 A/cm² oplopen doch het systeem werkt bij 1.5 tot 1.8 °K.

Deze extreem lage temperaturen en het gebruik van dure materialen maakt deze op eerste zicht aantrekkelijke technologie tot een zeer dure oplossing die alleen voor zeer grote eenheden (van bijvoorbeeld 300 MWh) in aanmerking komt. De huidige prijs wordt geraamd op $A 16 000$ per KWh stockage capaciteit, cijfer dat met een faktor 100 zou dienen verlaagd te worden om economisch aantrekkelijk te zijn.

Om deze redenen is de elektromagnetische opslag van elektriciteit als een lange termijn optie beschouwd.

8. BESLUIT

De stockage van elektrische energie is een aangelegenheid welke in de nabije toekomst steeds meer de aandacht van de energie sektor zal gaande houden.

Door toename van het nucleaire potentiël zal de hoeveelheid off-piek elektriciteit niet meer kunnen opgenomen worden door de ontkoppelbare grote verbruikers. De elektrische energie sektor beschouwt dan ook volgende oplossingen:

a) bovengrondse pompcentrales zijn het meest economisch en worden in heel veel landen waar het relief het toelaat gebouwd en bedreven,

b) ondergrondse pompcentrales mogelijk gekoppeld aan perslucht opslag vertegenwoordigen de tweede generatie pompcentrales die het voordeel hebben opgericht te kunnen worden in streken zonder merkbaar relief,

c) opslag van elektrische stroom in batterijen is een mogelijke optie die echter beperkt is door de uiterst grote volumina van de te installeren batterijen, door de materiaal beschikbaarheid en door de kostprijs,

d) de omzetting van elektrisché stroom in een secundaire vektor zoals waterstof is een toekomst optie welke alleen dan haar plaats zal vinden in de ekonomie wanneer de verschaarsing van fossiele energiebronnen voelbaar wordt. Seizoen stockage behoort echter tot de mogelijkheden,

e) de meer futuristische oplossingen zoals vliegwielen en elektromagnetische opslag methodes zijn in elk geval beperkt tot korte duur stockage en bevinden zich nu nog in de faze van het laboratorium onderzoek.

REFERENTIES

- [1] P.A. LEWIS, AED Conf. 1973, O5O.OO3 (1973)
- [2] V.SULZBERGER, EPRI project SR-33, Report No PB 251 490 (maart 1976)
- [3] Anoniem - Assessment of energy storage systems suitable for use by electric utilities EPRI project 225, report No EPRI-EM 264, Vol. I, II, III, IV (juli 1976)
- [4] J. HOSTE, A. JAUMOTTE, Commissie van beraad inzake kernenergie, eindrapport, (maart 1976)
- [5] M. POTEMANS, Concensus No 1978-1 pp 1-12
- [6] J. SEYDEL, Energie 1977, pp 25-30
- [7] D.J. WALUKAS, Westinghouse research laboratories, project FEA-D 76/233, Dec. 1975 Report No PB 254 775 (1976)
- [8] N. BIEDERMANN, EPRI project 32O 1 FR, Aug. 75, Report No PB 247 219 (1976)
- [9] E. GILEADI et al. J. of Power Sources 2 (1977-1978) 191-200
- [10] W.V. HASSENZAHN, IEEE, Intercon Techn. Paper, 1973 Vol. 3, pp. 26-30, Report No EI 74O 419 216 (1973)
- [11] G.C. GARDNER CEGB Research, pp. 12-20, May 1975

TABEL III

JAARLIJKSE BATTERIJ KOST PER OPGESLAGEN KWh VOOR HET LOOD H₂SO₄ TYPE

Stroom aflevering tussen 100 en 80 % belading

| komponent | 10 MW 50 MWh | 10 MW 100 MWh |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | batterij 3072 cellen \$/KWh | batterij 5250 cellen \$/KWh |
| batterij en periferie | | |
| celkosten | 65.53 | 55.10 |
| celverbindingen | 2.15 | 1.83 |
| waterkoeling | 5.68 | 5.20 |
| air lift | 0.17 | 0.14 |
| instrumentatie | 1.20 | 0.91 |
| gebouw en onderhoud | | |
| gebouw \$ 300/m ² | 10.74 | 8.8 |
| uitrusting | 1.58 | 0.95 |
| grondwerken | 2.00 | 2.00 |
| transport | 2.20 | 2.10 |
| TOTAAL | 91.25 | 77.00 |

TABEL IV

KARAKTERISTIEKEN EN PRIJS VAN ENKELE BATTERIJ TYPES

| type | bedrijfstemperatuur | specifiek vermogen Wh/kg | prijs \$/KWh |
|---------------------------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------|
| lood - H ₂ SO ₄ | 20- 50°C | 30-50 | 32-65 |
| natrium-zwavel | 300-350°C | 200-250 | 15-25 |
| lithium-metaalsulfide | 400-450°C | 100-150 | 30-35 |
| natrium-chloride | 180-210°C | 150 | 15-25 |

TABEL V

PRODUKTIEKOSTEN VOOR AMMONIAK 1000 T/dag fabriek

| energie grondstof prijs | klassiek aardgas \$ l/j | elektrolyse elektriciteit 10 mills/KWh |
|-------------------------------|-------------------------------|--|
| investering 10 \$ | | |
| energie-grondstof | 11.5 | 31.9 |
| elektriciteit (2.5 c \$/KWh) | 0.8 | - |
| onderhoud | 1.4 | 2.3 |
| exploitatie | 2.3 | 2.3 |
| financiële lasten (18 %) | 8.4 | 14.0 |
| | 24.4 | 50.5 |
| \$ per ton NH ₃ | 74 | 154 |

TABEL VI

ELEKTROCHEMISCH REGENERATIEF SYSTEEM VOOR OPSLAG VAN ELEKTRICITEIT

Elektrolyse

| | H ₂ O | HCl |
|--|------------------|------|
| teoretisch ontbindingspotentiaal (V) | 1.23 | 1.35 |
| praktisch ontbindingspotentiaal bij 5 kA/m ² | 1.65 | 1.50 |
| elektrolyt | NaOH | HCl |
| rekombinatie (fuel cell) rekombinatie potentiaal (V) | 0.8 | 1.2 |
| | rendement in % | |
| elektrolyse | 80 | 100 |
| rekombinatie | 60 | 80 |
| globaal elektrisch rendement | 50 | 80 |

