



Education in Hydrogen Technologies Area

WATERSTOFVOERTUIGEN MET BRANDSTOFCELLEN



**Co-funded by
the European Union**

Project is supported
within the Erasmus+ programme
2021-1-CZ01-KA220-VET-000028073

Inhoud	2
Inleiding - Redenen voor het gebruik van waterstof als voertuigbrandstof	4
1 Waterstof als energiebron	6
1.1 Productie van waterstof uit fossiele brandstoffen.....	7
1.1.1 Stoomreforming van aardgas	7
1.1.2 Gedeeltelijke oxidatie van koolwaterstoffen	7
1.1.3 Kolenvergassing.....	8
1.2 Productie van waterstof door elektrolyse van water.....	8
1.3 Productie van waterstof uit biomassa.....	8
1.4 Productie van waterstof uit alternatieve energiebronnen	9
1.5 Referenties	9
1.6 Vragen aan het eind van het hoofdstuk:	9
2 Brandstofcellen	10
2.1 Inleiding	10
2.2 Historische ontwikkeling	10
2.3 Principe.....	11
2.4 Soorten brandstofcellen.....	13
2.4.1 Alkalische elektrolytische brandstofcellen (AFC)	13
2.4.2 Polymeermembraanbrandstofcellen (PEMFC).....	13
2.4.3 Fosforzuur brandstofcellen (PAFC).....	13
2.4.4 Brandstofcellen op basis van gesmolten carbonaat (MCFC).....	13
2.4.5 Vaste oxide brandstofcellen (SOFC)	14
2.5 Vragen aan het eind van het hoofdstuk:	14
3 Elektrische motoren in voertuigen	14
3.1 Gelijkstroommotoren	14
3.1.1 Afzonderlijk bekrachtigde gelijkstroommotor	15
3.1.2 Gelijkstroommotor in serie	16
3.1.3 Parallele gelijkstroommotor	17
3.1.4 Samengestelde gelijkstroommotor	18
3.1.5 Borstelloze gelijkstroommotor	18
3.1.6 Samenvatting.....	19
3.2 AC-motoren (wisselstroom)	20

4.2.1	Asynchrone motor	20
3.2.1	Dwarsfluxmotor	21
3.2.2	Synchrone motor	21
3.2.3	Geregelde reluctantiemotor	22
3.2.4	Samenvatting	24
3.3	Vragen aan het eind van het hoofdstuk:	25
4	Voertuigen op waterstof	25
4.1	Japanse Toyota Mirai is in massa geproduceerde auto op waterstof	26
4.1.1	Rijprestaties (Toyota-gegevens november 2014)	26
4.2	Een andere in massa geproduceerde auto op waterstof is de Hyundai Nexo	27
4.3	Waterstofbus Solaris Urbino 12	28
4.4	Waterstofbus ŠKODA H'CITY 12	28
4.5	Hyundai HFC BUS	29
4.6	Waterstoffrein van Deutsche Bahn	29
4.7	Vragen aan het eind van het hoofdstuk:	30

Ondersteund door de Europese Unie. De standpunten en meningen zijn echter uitsluitend die van de auteurs en komen niet noodzakelijkerwijs overeen met die van de Europese Unie of het Uitvoerend Agentschap voor onderwijs en cultuur (EACEA). Noch de Europese Unie, noch het EACEA kan verantwoordelijk worden gehouden.

INLEIDING - REDENEN VOOR HET GEBRUIK VAN WATERSTOF ALS VOERTUIGBRANDSTOF

Redenen voor het gebruik van waterstof als brandstof in voertuigen - vermindering van het verbruik van fossiele brandstoffen en de productie van schadelijke emissies

Men verwacht dat de productie van fossiele brandstoffen (voornamelijk olie en aardgas) in de toekomst zal afnemen en dat de prijzen ervan zullen blijven stijgen. Een alternatieve brandstof om deze te vervangen zou waterstof kunnen zijn, aangezien de reserves daarvan in water bijna onuitputtelijk zijn.

De verbrandingswarmte van waterstof werd al lang geleden opgemerkt door natuurwetenschappers en technici, maar het industriële gebruik ervan begon pas in het begin van de 20e eeuw, voornamelijk voor lassen of als hydrogeneer- en reductiemiddel. De eerste experimenten met het gebruik van waterstof als brandstof voor raketmotoren begonnen in het begin van de jaren vijftig en bereikten pas halverwege de jaren zestig de uitvoeringsfase.

Het belangrijkste voordeel van waterstof als brandstof is de schone verbranding ervan. Wanneer waterstof in verbrandingsmotoren of in brandstofcellen wordt gebruikt, produceert het thermische, mechanische of elektrische energie en een onschadelijk bijproduct: water. Het produceert geen CO₂-afval of andere bijproducten van de verbranding van vaste, vloeibare of gasvormige koolwaterstoffen. CO₂ is de belangrijkste component van broeikasgassen, en de waterstofeconomie is er vooral op gericht de vorming ervan te beperken.

De waterstofreserves in water zijn bijna onuitputtelijk. Het heeft een hoge energiedichtheid per gewichtseenheid en kan worden getransporteerd en opgeslagen. Vanuit milieuoogpunt is het verbranden van waterstof schoner dan het verbranden van fossiele brandstoffen, en het geproduceerde water gaat niet gepaard met toxische verbindingen of broeikasgassen.

Op industriële schaal wordt waterstof enerzijds geproduceerd door petrochemische processen, waaronder steenkoolvergassing (goed voor 90% van de productie), en door elektrolyse van water. Het is ook een belangrijk bijproduct of bestanddeel van gassen die ontstaan in raffinaderijen, cokesfabrieken en bij elektrochemische productie op basis van waterige oplossingen van anorganische zuren of zouten.

Waterstof is een kleurloos, smaak- en reukloos gas en is het lichtste van alle gassen.

Chemische formule: H₂

CAS-nummer: 1333-74-0

EG-nummer: 215-605-7

VN-nummer: 1049

Waterstof is het eenvoudigste en meest voorkomende element in het heelal, met een aandeel van ongeveer 75%. Hoewel moleculaire waterstof (H₂) op aarde zeldzaam is, komt het gebonden voor in water en koolwaterstoffen.

De lage dichtheid ervan levert echter problemen op bij de opslag en distributie. Aangezien vloeibaarmaking alleen mogelijk is na afkoeling tot onder de kritische temperatuur van 33,15 K

Het hoofddoel van de invoering van de waterstofeconomie is het bereiken van klimaatneutraliteit in 2050.

Het belang van waterstof is herhaaldelijk benadrukt in strategiedocumenten voor de Green Deal, waaronder de "Waterstofstrategie voor een klimaatneutraal Europa".

Fysieke eigenschappen

Moleculair gewicht: 2,02 g

Kookpunt: -252,9 °C

Drievoudig punt: -259,2 °C

Kritische temperatuur: -239,9 °C

Kritische druk: 12,8 atm

Gasdichtheid bij 0 °C en 1 atm (lucht = 1): 0,089 g/l

Gasdichtheid bij 25 °C en 1 atm (lucht = 1): 0,069 g/l

Zelfontbrandingstemperatuur in lucht bij 1 atm: 570 °C

Hoewel waterstof bij omgevingstemperatuur relatief inactief is, reageert het bij hogere temperaturen met de meeste andere elementen. Zo kan waterstof bij verhoogde temperaturen metaaloxiden reduceren. Deze reactiviteit bij hoge temperaturen wordt veel gebruikt in de meeste industriële waterstofinstallaties buiten de energiesector.

Daarom kan waterstof worden beschouwd als onverenigbaar met oxidanten zoals lucht, zuurstof en halogenen. Zo reageren fluor en waterstof bij een temperatuur van 250 °C in aanwezigheid van onzuiverheden. Mengsels van chloor en waterstof zijn bij blootstelling aan licht explosief, en lithium brandt in een waterstofatmosfeer.

Waterstof is een uiterst brandbaar gas en brandt in lucht met een lichtblauwe vlam die in concentraties van 4 tot 75% van het volume onder standaardomstandigheden praktisch onzichtbaar is.

Bovendien wordt waterstof verwerkt bij hoge druk. Bij een lek veroorzaakt de waterstof een omgekeerd Joule-Thompson-effect, waardoor het ontsnappende gas heet genoeg wordt om onmiddellijk te ontbranden. Dit verhoogt de lage minimale ontstekingsenergie van het ontvlambare

mengsel van waterstof en lucht, waardoor het gevoeliger is voor de ontstekingskans dan andere ontvlambare gassen.

De kans op ontsteking is ook groter dan bij andere brandbare gassen, omdat de waterstofmolecule door haar kleine omvang gemakkelijker door kleine gaatjes kan lekken. Deze eigenschap is de reden waarom apparatuur die bedoeld is om waterstof te bevatten soms op dichtheid wordt getest met helium, een inert gas, aangezien de molecuulgrootte daarvan vergelijkbaar is met die van waterstof.

Omdat waterstof lichter is dan lucht, stijgt het gas gemakkelijk op in de atmosfeer, in tegenstelling tot propaan, dat op de grond blijft, waardoor het explosiegevaar toeneemt. Uit de praktijk blijkt dat waterstof in de open lucht niet ontbrandt.

Het grootste gevaar bij het gebruik van waterstof is dan ook de vorming van brandbare mengsels met lucht, die bij blootstelling aan een ontstekingsbron tot brand of eventueel deflagratie kunnen leiden. De spleet waarin een waterstofvlam zich kan verspreiden is veel smaller dan bij de meeste andere gassen, waardoor het zeer moeilijk is om elektrische motoren te ontwerpen die voldoende "robuust" zijn voor gebruik in atmosferen waar een brandbaar mengsel van waterstof en lucht aanwezig kan zijn.

Vragen:

1. Waarom wil men fossiele brandstoffen vervangen door waterstof?
2. Wanneer en waarvoor werd waterstof voor het eerst industrieel gebruikt?
3. Wanneer werd waterstof voor het eerst gebruikt als brandstof voor raketmotoren?
4. Wat is het belangrijkste voordeel van waterstof als brandstof?
5. Wat zijn de andere voordelen van waterstof als brandstof?

1 WATERSTOF ALS ENERGIEBRON

DOELSTELLINGEN:

In dit hoofdstuk zullen we kort ingaan op manieren om waterstof te produceren uit fossiele brandstoffen, of door elektrolyse van water met behulp van elektriciteit die bijvoorbeeld uit hernieuwbare energiebronnen is verkregen.

TREFWOORDEN:

Waterstofproductie, fossiele brandstof, omzetten, gedeeltelijke oxidatie, elektrolyse, alternatieve bronnen

Meer informatie over waterstofproductie vindt u in een andere module, maar met het oog op een algemeen overzicht in dit deel vermelden wij het hier ook.

Een van de alternatieven voor de vervanging van koolwaterstofbrandstoffen is het gebruik van waterstof, een stof die in de natuur nauwelijks voorkomt en dus moet worden geproduceerd.

Een mogelijke manier om het te verkrijgen is uit fossiele brandstoffen zoals olie, aardgas en steenkool, maar dit staat haaks op de vermindering van de productie van deze brandstoffen.

De tweede mogelijkheid is het gebruik van elektrolyse van water, waarvoor een aanzienlijke hoeveelheid elektrische energie nodig is die op de een of andere manier moet worden opgewekt, zoals in conventionele elektriciteitscentrales, die echter fossiele brandstoffen verbruiken.

Waterstofproductie kan worden onderverdeeld in:

- productie van waterstof uit fossiele brandstoffen
- productie van waterstof door elektrolyse
- productie van waterstof uit biomassa
- productie van waterstof uit alternatieve energiebronnen.

1.1 PRODUCTIE VAN WATERSTOF UIT FOSSIELE BRANDSTOFFEN

1.1.1 STOOMREFORMING VAN AARDGAS

- momenteel de meest verspreide methode van waterstofproductie

Proces:

1. ontwaveling van aardgas
2. hervorming van methaan met stoom
3. CO-conversie
4. CO₂ schrobben
5. methanisatie

Voordeel: laagste productiekosten (36-38% lager dan waterstofproductie via gedeeltelijke oxidatie van koolwaterstoffen en steenkoolvergassing).

1.1.2 GEDEELTELIJKE OXIDATIE VAN KOOLWATERSTOFFEN

- De op één na meest gebruikte manier om waterstof te produceren in de wereld. Als grondstof kunnen zowel gasvormige als vloeibare grondstoffen worden gebruikt die worden verkregen bij de primaire en secundaire verwerking van aardolie.
- De grondstof wordt vergast met stoom en zuurstof bij temperaturen van 1300-1430 °C.
- De hoge temperatuur en de afwezigheid van een katalysator maken het mogelijk zware oliefracties, stookolie, vacuümresiduen en propaanafval als grondstoffen te gebruiken, die gekenmerkt worden door een aanzienlijke roetvorming.

Nadeel: vorming van koolmonoxide samen met kooldioxide.

1.1.3 KOLENVERGASSING

- De productie van waterstof door vergassing van steenkool is vergelijkbaar met de productie door gedeeltelijke oxidatie van aardolieresiduen.

Proces:

1. productie van synthesegas door vergassing van steenkool met zuurstof of lucht en stoom in een vergassingsgenerator
2. koeling van het hete synthesegas
3. gaszuivering en scheiding van waterstof uit het gas

Nadeel: hogere productiekosten

1.2 PRODUCTIE VAN WATERSTOF DOOR ELEKTROLYSE VAN WATER

- Klassieke, beproefde productietechnologie

Proces:

- Een elektrische gelijkstroom door twee in water ondergedompelde metalen elektroden wordt gebruikt om water op te splitsen in gasvormig waterstof en gasvormig zuurstof.
- De productie van waterstof door elektrolyse kan ook plaatsvinden met behulp van elektrische energie uit hernieuwbare bronnen, zoals zonne-energie, windenergie, waterkracht of kernenergie.

1.3 PRODUCTIE VAN WATERSTOF UIT BIOMASSA

De productie van waterstof uit biomassa kan in twee processen worden onderverdeeld:

- stoomreforming van biomassa - pyrolyse
- biotechnologische processen - gisting

Een andere mogelijke methode is het gebruik van derivaten van biomassa, zoals bio-ethanol en biogas, maar hier is het beter deze derivaten rechtstreeks als brandstof te gebruiken.

De door deze methode verwerkte substraten lopen sterk uiteen, van vast stedelijk afval, afval uit de voedingsindustrie, olie, tot doelgericht geteelde of afgedankte landbouwbiomassa.

1.4 PRODUCTIE VAN WATERSTOF UIT ALTERNATIEVE ENERGIEBRONNEN

Zoals hierboven beschreven kan waterelektrolyse ook worden uitgevoerd met behulp van elektriciteit uit hernieuwbare bronnen.

De meest veelbelovende energiebron op dit gebied is zonne-energie. Om de efficiëntie van de waterstofproductie te verbeteren, worden nieuwe methoden van waterelektrolyse ontwikkeld, zoals:

- elektrolyse bij hoge temperatuur (thermolyse)
 - o een deel van de energie wordt geleverd als elektrische energie, terwijl de rest wordt geleverd als warmte
 - o het voordeel is een hogere procesefficiëntie door een lager elektriciteitsverbruik
- thermochemische cycli
 - o water wordt gesplitst in zuurstof en waterstof via een reeks chemische reacties, in gang gezet door warmte of een combinatie van warmte en elektriciteit in hybride cycli (de meest bekende is de thermochemische cyclus - zwavelzuur hybride cyclus van de firma Westinghouse).

1.5 REFERENTIES

HROMÁDKO, Jan. Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.

1.6 VRAGEN AAN HET EIND VAN HET HOOFDSTUK:

1. Waarom moet waterstof worden geproduceerd om het als energiebron te kunnen gebruiken?
2. Waarom is waterstof nodig voor energieproductie?
3. Wat is het voordeel van stoomreforming van aardgas?
4. Wat is de grondstof bij gedeeltelijke oxidatie van koolwaterstof?
5. Wat is het nadeel van gedeeltelijke oxidatie van koolwaterstof?
6. Wat is het nadeel van de productie van waterstof door steenkoolvergassing?
7. Wat is het proces van waterstofproductie door elektrolyse van water?
8. Wat is gisting?
9. Welke substraten worden gebruikt om waterstof uit biomassa te produceren?
10. Elektrolyse van water kan ook plaatsvinden met behulp van elektriciteit uit hernieuwbare bronnen. Noem er enkele. Welke van deze bronnen is het meest veelbelovend?
11. Wat zijn de nieuwe varianten van waterontleding?

2 BRANDSTOFCELLEN

DOELSTELLINGEN:

Het doel van dit hoofdstuk is het principe van elektriciteitsopwekking met behulp van een brandstofcel te begrijpen en de verschillende types te leren kennen.

TREFWOORDEN:

brandstofcel, oxidatiemiddel, waterstof, membraan, vaste oxiden

2.1 INLEIDING

Alle vandaag geproduceerde voertuigen met verbrandingsmotor verbranden fossiele brandstoffen en hebben dus een negatieve invloed op het milieu. Elektrische batterijvoertuigen bieden daarentegen tal van voordelen. Ze zijn stil, stoten geen schadelijke stoffen uit in het milieu, hebben geen transmissie nodig voor hun werking en hun elektrische motoren zijn zeer efficiënt. Een groot nadeel van door batterijen aangedreven voertuigen is echter hun zware gewicht en beperkte levensduur van de batterijen. Brandstofcellen worden voorgesteld als een alternatief voor deze zware batterijen. Voertuigen die worden aangedreven door brandstofcellen hebben ook minder impact op het milieu, zijn niet afhankelijk van fossiele brandstoffen en zijn zeer efficiënt. Brandstofcellen kunnen onder specifieke omstandigheden onbeperkt energie leveren en hun vermogen kan gemakkelijk worden aangepast binnen een breed bereik.

2.2 HISTORISCHE ONTWIKKELING

De ontbinding van water in zuurstof en waterstof met behulp van elektrische stroom werd voor het eerst gedemonstreerd in 1802 door Sir Davy Humphrey. De conclusie van zijn experiment was dat er nog steeds een kleine elektrische lading op de elektroden aanwezig was, zelfs nadat de bron van de elektrische stroom al was losgekoppeld. Hij kon dit verschijnsel echter niet afdoende verklaren.

Het basisprincipe van de brandstofcel werd in 1838 ontdekt door de Zwitserse wetenschapper Christian Friedrich Schönbein, die het een jaar later beschreef in een van zijn publicaties. Het artikel behandelde de ontdekking van ozon en de reactie tussen zuurstof en waterstof die een elektrische potentiaal aan de elektroden produceerde. Sir William Grove, die wordt beschouwd als de "vader" van de brandstofcellen, bouwde het eerste werkende prototype op basis van dit theoretische werk. In 1843 schreef hij verder over dit onderwerp in een artikel over de opslag van elektrische energie met behulp van gassen.

De term "brandstofcel" werd waarschijnlijk voor het eerst gebruikt door Charles Langer en Ludwig Mond in 1889, toen zij probeerden een cel te ontwikkelen die werd aangedreven door lampgas. Ondanks verbeteringen door William Jacques, die fosforzuur als elektrolyt gebruikte, bleven de

productiekosten van deze cel te hoog. Na de uitvinding van de dynamo door Werner von Siemens raakte de brandstofcel in de vergetelheid en pas in 1952 werd het eerste bruikbare prototype met een vermogen van 5 kW gepresenteerd door de uitvinder, Francis Thomas Bacon. Dit prototype gebruikte kaliumhydroxide als elektrolyt.

In de jaren zestig werd de waterstofbrandstofcel een belangrijk en veelbesproken onderwerp vanwege het ruimteonderzoek, omdat deze een gunstigere energie-gewichtsverhouding heeft dan andere energiebronnen. Brandstofcellen werden bijvoorbeeld geïnstalleerd op Apollo-ruimtevaartuigen en zij dreven ook de Space Shuttles aan, waarbij elke orbiter drie brandstofcellen bevatte, elk met een continu vermogen van 7 kW en een piekvermogen van 12 kW. Een van de belangrijkste voordelen was dat het afvalproduct van de waterstof-zuurstofcel zuiver water was, dat kon worden gebruikt in het watersysteem van de shuttle.

Sinds het einde van de Tweede Wereldoorlog is het de Duitse marine verboden nucleaire onderzeeërs te gebruiken, en daarom zocht zij naar een alternatieve bron van elektrische energie. Een van de oplossingen was het gebruik van brandstofcellen, waarbij cellen die 30 kW vermogen produceren werden gebruikt in oudere generaties schepen, en cellen die 120 kW vermogen produceren in nieuwere. Van 2005 tot 2008 werd in Noorwegen de eerste waterstofsnelweg, HyNor genaamd, met een lengte van 560 km in gebruik genomen.

In 2008 werd in de steden Los Angeles, San Francisco en Las Vegas in de Verenigde Staten een netwerk van tankstations voor waterstof en verhuur van brandstofcelauto's in gebruik genomen. Het gaat om Honda FCX Clarity-voertuigen met een PEM-brandstofcel van 100 kW. In juni 2009 werd in Tsjechië de TriHyBus in gebruik genomen, de eerste bus met brandstofcel in het voormalige Oostblok. In oktober 2009 werd in Neratovice het eerste waterstoftankstation in de landen van het voormalige Oostblok in gebruik genomen.

2.3 PRINCIPE

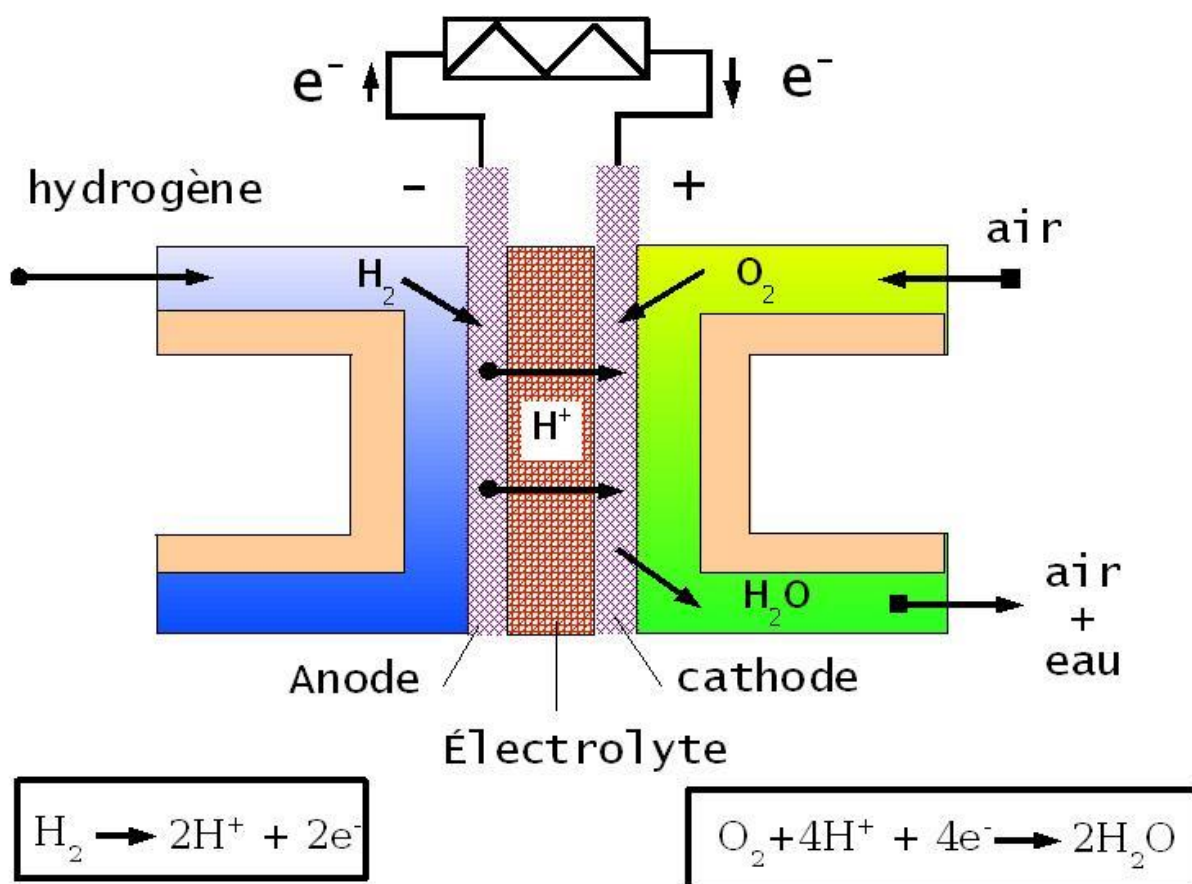
Brandstofcellen worden in het algemeen gedefinieerd als elektrochemische apparaten en hun functie is het omzetten van waterstof (brandstof) en zuurstof (oxidator) in elektrische energie. Deze galvanische cellen bevatten twee elektroden, gescheiden door een membraan of een elektrolyt. De brandstof (waterstof) wordt aan de positieve elektrode toegevoerd, terwijl het oxidatiemiddel (zuurstof) aan de negatieve elektrode wordt toegevoerd. Bij de positieve elektrode (anode) ontstaan elektronen, die via een extern elektrisch circuit naar de negatieve elektrode (kathode) stromen en zo een elektrische stroom opwekken. In theorie kan een brandstofcel continu werken zolang de toevoer van brandstof of oxidatiemiddel naar de elektroden niet wordt onderbroken.

Er zijn vele combinaties van brandstof en oxidator. Zo gebruikt een zuurstof-waterstofcel waterstof als brandstof en zuurstof als oxidator, waarbij zuiver water als afvalproduct ontstaat. Andere cellen gebruiken koolwaterstoffen en alcoholen als brandstof. In plaats van zuivere zuurstof kan ook lucht, chloor of chloordioxide als oxidatiemiddel worden gebruikt.

De elektroden kunnen worden gemaakt van koolstof (nanobuisjes) of diverse metalen, en hun efficiëntie kan worden verhoogd door ze te bekleden met katalysatoren, zoals palladium of platina.

Verschillende zuren, meestal fosforzuur (H_3PO_4), of hierop gebaseerd, meestal kaliumhydroxide (KOH), keramiek of membranen kunnen als elektrolyt dienen. In specifieke brandstofcellen wordt gas onder hoge druk gebruikt als elektrolyt. De tegenwoordig meest gebruikte elektrolyt is KOH , dat al in cellen van het Apollo-project werd gebruikt. Het nadeel van deze elektrolyt is echter dat de oxidator moet worden ontdaan van CO_2 om te voorkomen dat kooldioxide ermee reageert, aangezien het resulterende kaliumcarbonaat niet langer de functie van de elektrolyt zou vervullen.

De resulterende elektrische spanning is theoretisch ongeveer 1,23 volt, en de waarde ervan hangt af van het gebruikte type brandstof en de kwaliteit van de cel. Momenteel produceren de meest gebruikte cellen doorgaans een spanning van 0,5 - 0,95 V. Om een hogere spanning te bereiken kunnen meerdere brandstofcellen in serie worden geschakeld. De grootte van de stroom hangt af van de oppervlakte van de cel, en commercieel beschikbare cellen kunnen tegenwoordig ongeveer 0,5 W/cm^2 leveren.



Plaatje 1 - schematische weergave van reacties in een brandstofcel (bron: https://cs.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell)

De brandstof wordt aan de anode katalytisch geoxideerd tot kationen (zoals waterstof tot H^+). Deze kationen gaan door het membraan of in de elektrolyt. De vrijgekomen elektronen worden verzameld aan de anode en gaan naar het elektrische apparaat. Omdat elektronen een negatieve lading dragen, stroomt de elektrische stroom in tegengestelde richting, van de kathode (+), door het elektrische apparaat naar de anode (-). Aan de kathode wordt het oxidatiemiddel gereduceerd tot anionen (zoals zuurstof tot O_2^-), die zich vervolgens verbinden met kationen (bijvoorbeeld waterstof en zuurstof om water te vormen).

2.4 SOORTEN BRANDSTOFCELLEN

Brandstofcellen kunnen op basis van hun bedrijfstemperatuur worden ingedeeld in lage- en hogetemperatuurcellen, of op basis van de gebruikte elektrolyt.

2.4.1 ALKALISCHE ELEKTROLYTISCHE BRANDSTOFCELLEN (AFC)

Deze cellen behoren tot de oudste en maken gebruik van een waterige oplossing van alkalische hydroxide (NaOH, KOH) in een asbestmatrix als elektrolyt. Hun bedrijfstemperatuur kan oplopen tot 230 °C. Als brandstof wordt zuivere waterstof gebruikt en als oxidatiemiddel zuivere zuurstof of kooldioxidevrije lucht.

In deze cellen kunnen verschillende soorten katalysatoren worden gebruikt, niet alleen die op basis van platina. Nikkel, zilver, hun oxiden of edele metalen kunnen worden gebruikt. Deze cellen worden vooral gebruikt in de ruimtevaart of voor militaire toepassingen.

2.4.2 POLYMEERMEMBRAANBRANDSTOFCELLEN (PEMFC)

In dit type brandstofcel wordt een polymeermembraan als elektrolyt gebruikt. Het membraan moet waterstofionen (protonen) geleiden. en moet worden bevochtigd om goed te kunnen functioneren. Meestal worden gesulfoneerde fluoropolymeren (Nafionen) gebruikt. Als katalysator wordt vaak platina gebruikt, aangebracht in de vorm van een gasdiffusielaag. Als brandstof wordt waterstof of methanol gebruikt en als oxidator zuurstof of lucht. De bedrijfstemperatuur van dit type cel is maximaal 90 °C, waardoor het de beste optie is voor de aandrijving van voertuigen.

2.4.3 FOSFORZUUR BRANDSTOFCELLEN (PAFC)

De in deze brandstofcel gebruikte elektrolyt is 100% fosforzuur, dat wordt gefixeerd in een matrix, zoals asbest, polybenzylimidazool. De bedrijfstemperatuur van deze cellen is 150-220 °C, en temperaturen boven 180 °C hebben het voordeel dat de evenwichtsconstante verschuift ten gunste van kooldioxide, waardoor het probleem van koolmonoxidevergiftiging verdwijnt. In dit geval kan direct gebruik worden gemaakt van gas uit de stoomreforming.

Ook hier wordt platina gebruikt als katalysator, en waterstof, dat door middel van stoomreforming uit fossiele brandstoffen wordt verkregen, wordt als brandstof gebruikt. Als oxidator wordt lucht gebruikt. Deze brandstofcellen worden gebruikt in warmtekrachtkoppelingseenheden.

2.4.4 BRANDSTOFCELLEN OP BASIS VAN GESMOLTEN CARBONAAT (MCFC)

Als elektrolyt in deze brandstofcellen wordt een mengsel van alkalische carbonaten gebruikt, waarvan de bedrijfstemperatuur tussen 600-700 °C ligt. De genoemde carbonaten vormen een smelt van sterk geleidende zouten.

Dure katalysatoren zijn in deze brandstofcellen niet nodig omdat interne omzetting hun rendement verhoogt, zodat de brandstof niet extreem schoon hoeft te zijn. Als brandstof wordt gas gebruikt dat afkomstig is van de stoomreforming van fossiele brandstoffen of biogas, terwijl lucht wordt gebruikt als oxidatiemiddel. Deze brandstofcellen worden gebruikt in elektriciteitscentrales en warmtekrachtkoppelingseenheden.

2.4.5 VASTE OXIDE BRANDSTOFCELLEN (SOFC)

In dit type brandstofcel wordt een keramisch membraan gebruikt als elektrolyt, en er zijn geen dure katalysatoren nodig. Deze cellen werken bij hoge temperaturen (ongeveer 800-1000°C), en hun rendement kan worden verhoogd door de reactieproducten te gebruiken in een expansieturbine. Als brandstof kan gas uit de stoomreforming van fossiele brandstoffen en biogas, aardgas of biogas worden gebruikt, en als oxidatiemiddel wordt lucht gebruikt. Dit type brandstofcel vindt toepassingen in warmtekrachtkoppelingseenheden en elektriciteitscentrales.

2.5 VRAGEN AAN HET EIND VAN HET HOOFDSTUK:

- Wat zijn de voordelen van voertuigen met een accu ten opzichte van voertuigen met een verbrandingsmotor?
- Wie bouwde het eerste werkende brandstofcel-prototype?
- Wat is het afvalproduct van een waterstof-zuurstof brandstofcel?
- Wat is een van de grootste nadelen van elektrisch aangedreven voertuigen?
- Wat is een brandstofcel?
- Waaruit bestaat een brandstofcel?

3 ELEKTRISCHE MOTOREN IN VOERTUIGEN

DOELSTELLINGEN:

In dit deel zullen we meer leren over de verschillende soorten elektrische motoren voor waterstofvoertuigen, hun ontwerp, kenmerken, voor- en nadelen.

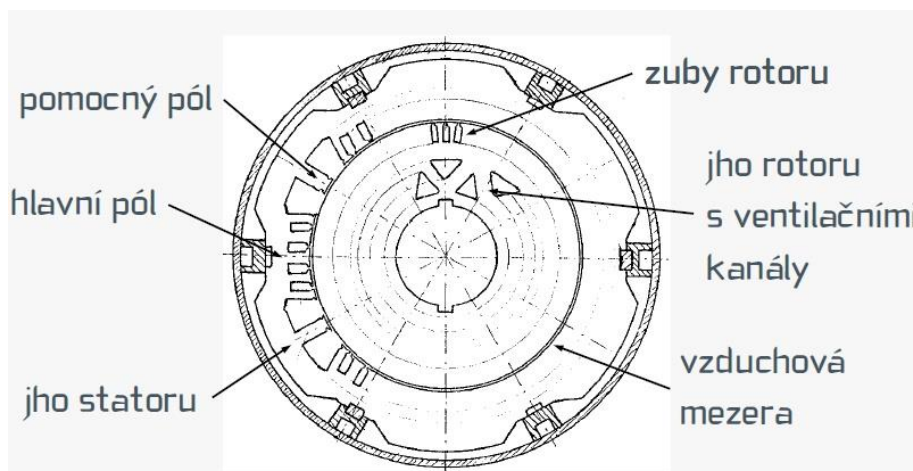
TREFWOORDEN:

stator, rotor, commutator, bekrachtigingswikkeling, permanente magneet, koppelkarakteristieken, synchrone, asynchrone, reluctantiemotor

3.1 DC (GELIJKSTROOM) MOTOREN

De gelijkstroommotor is een van de oudste motoren, en zoals elke motor bestaan gelijkstroommotoren uit een stator en een rotor. De stator kan bestaan uit permanente magneten of polen die aan het frame zijn vastgeschroefd en aan het uiteinde zijn verlengd met poolverlengstukken. Om de polen wordt dan een veldwikkeling gewikkeld en er kunnen ook hulppolen en hulpwikkelingen zijn. De rotor bestaat uit platen met groeven waarin de werkwikkeling is geplaatst. De platen hebben

ook ventilatiegaten. De elektrische stroom naar de rotor wordt geleverd via borstels die rusten op de commutator, die op de rotor is gemonteerd.



hulppool - hoofdpool - statorjuk - rotortanden - rotorjuk met ventilatiekanalen - luchtspleet

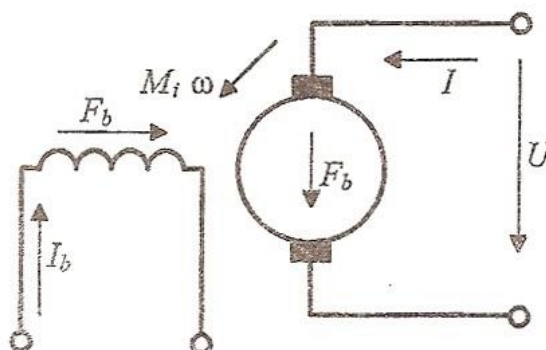
Plaatje 2 - Magneetschakeling van een gelijkstroommotor

Het door de veldwikkeling in de stator opgewekte magnetische veld werkt in op het in de rotor opgewekte magnetische veld ten gevolge van de stroom die via de borstels en de commutator naar de veldwikkeling wordt geleid, wat resulteert in een periodieke verandering van de stroom die naar de spoel, ook bekend als het anker, vloeit. Dit leidt op zijn beurt tot een rotatiekracht, of koppel, dat voortdurend in de draairichting werkt.

Volgens de manier waarop de veldwikkeling en het anker zijn aangesloten, kunnen gelijkstroommotoren worden onderverdeeld in motoren met externe bekrachtiging of zelfbekrachtiging. Motoren met zelfbekrachtiging worden verder ingedeeld in serie-, parallelle (afgeleide) of serie-parallelle (samengestelde) motoren.

3.1.1 AFZONDERLIJK BEKRACHTIGDE GELIJKSTROOMMOTOR

Plaatje 3 - Schematisch diagram van een afzonderlijk bekrachtigde gelijkstroommotor

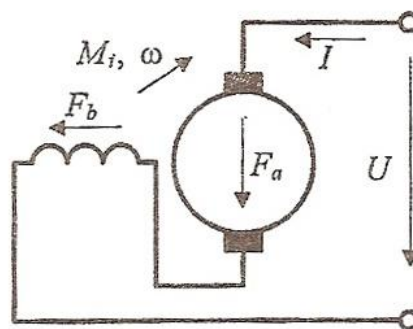


De veldwikkeling wordt gevoed door een afzonderlijke externe bron, zoals een accumulator. De regeling gebeurt door aanpassing van de spanning op de rotor en de bekrachtigingsstroom. Gelijkstroommotoren met externe bekrachtiging hebben een hard koppel dat bijzonder voordelig is

voor tractiedoeleinden. Het voordeel is de eenvoudige en soepele snelheidsregeling over een groot bereik en de mogelijkheid van een soepele overgang van rijden naar remmen. Hij heeft echter een lager overtrekkoppel.

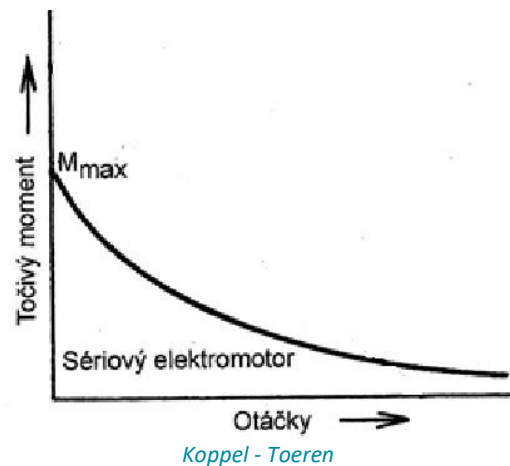
Bovendien wordt met een verhoogde spanning in het gehele motorsysteem een hoger rendement bereikt door minder spanningsverliezen op de borstels. Dit resulteert ook in een kleinere stroom in de motor en de verbindingsleidingen, wat leidt tot voordelen zoals een lager gewicht, kleinere afmetingen en lagere productiekosten. Deze motoren hebben een hoge overbelastingscapaciteit, die gedurende een uur 20% meer vermogen kan verwerken dan het nominale continue vermogen. Tijdens het opstarten kunnen ze zelfs korte tijd 100% meer vermogen aan. Deze motoren worden veel gebruikt in elektrische voertuigen, omdat ze rechtstreeks door de accu kunnen worden gevoed.

3.1.2 SERIE DC-MOTOR



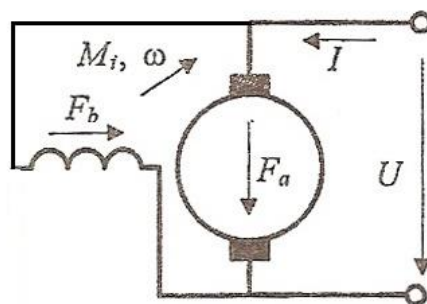
Plaatje 4 - Schema van een seriegelijkstroommotor

De veldwikkeling is in serie geschakeld met het anker, zodat de stroom in het anker ook de veldstroom is. Dit maakt de regeling van de motor eenvoudig, aangezien de spanning evenredig is met de vereiste stroomwaarde, zodat de vermogensregelaar de batterijspanning kan regelen door te schakelen of de frequentie aan te passen. De serie-elektromotor heeft een goed startkoppel, maar de koppelkarakteristiek is zeer zacht, met een snelle daling van het koppel naarmate het toerental toeneemt. Als de belasting wordt verminderd, kan het toerental zodanig stijgen dat dit schade aan de motor kan veroorzaken. Daarom wordt het niet aanbevolen om zonder belasting op de as te werken. Deze motoren worden gebruikt in elektrische auto's en elektrische tractievoertuigen zoals treinen, metro's en trams vanwege het hoge koppel bij lage snelheden en de mogelijkheid om de snelheid zelf aan te passen aan de belasting.



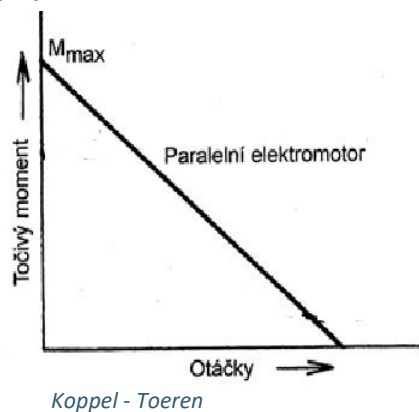
Plaatje 5 - Koppelkarakteristiek van een seriegelijkstroommotor

3.1.3 PARALLELE GELIJKSTROOMMOTOR



Plaatje 6 - Schematisch diagram van parallelle gelijkstroommotor

De veldwikkeling en het anker circuit zijn parallel verbonden met de bron via afzonderlijke regelementen. Dit type elektromotor kan gemakkelijk en soepel worden geregeld, maar in mindere mate dan een gelijkstroommotor met externe bekrachtiging. Zij hebben een hardere koppelkarakteristiek. Het koppel neemt langzamer, zij het lineair, af bij toenemend toerental. Bovendien remt de motor gemakkelijk af. Om deze redenen werd dit type elektromotor in de meeste elektrische voertuigen gebruikt.



Afbeelding 7 - Koppelkarakteristieken van een parallelle gelijkstroommotor

3.1.4 SAMENGESTELDE GELIJKSTROOMMOTOR

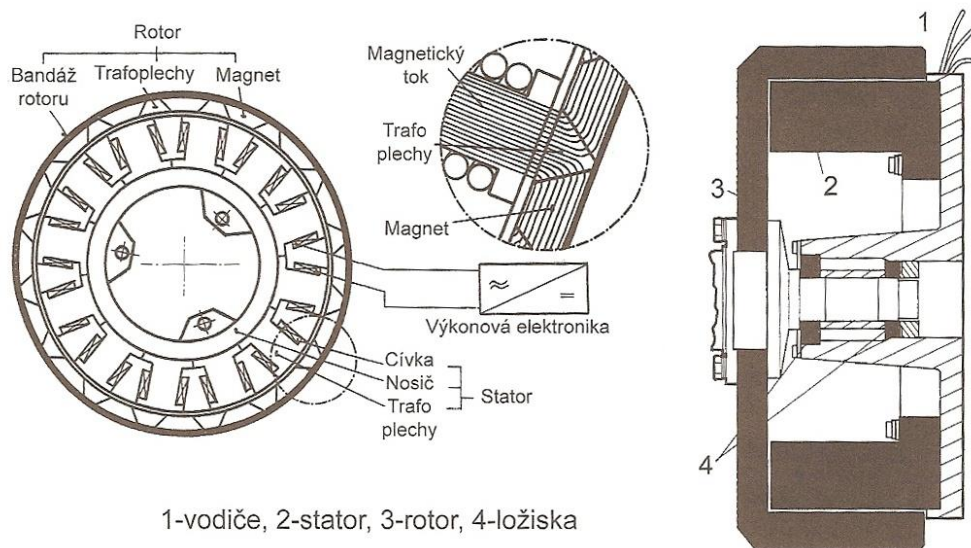
Een samengestelde elektromotor combineert de voordelen van beide voorgaande elektromotoren, waarbij één veldwikkeling in serie en de andere parallel aan het anker is geschakeld. De seriewikkeling is magnetisch verbonden in overeenstemming met de shuntwikkeling en veroorzaakt een verlaging van de snelheid en een verhoging van het koppel wanneer de motor wordt belast. De shuntwikkeling daarentegen beperkt het toerental bij stationair toerental.

3.1.5 BORSTELLOZE GELIJKSTROOMMOTOR

Bij een borstelloze gelijkstroommotor zijn de posities van rotor en stator verwisseld in vergelijking met een conventionele, permanent bekrachtigde gelijkstroommotor. De wikkeling bevindt zich in de buitenste stator waar zich gewoonlijk permanente magneten bevinden, en de permanente magneten bevinden zich in de rotor. Deze constructie is vergelijkbaar met die van een permanent bekrachtigde synchrone motor. De commutator voorziet de statorwikkeling van een pulsgemoduleerde gelijkstroom, waardoor de kosten van elektronische commutatie worden beperkt, aangezien de statorwikkeling doorgaans slechts uit drie of vier bundels wikkelingen bestaat. Deze bundels worden zodanig afgesteld dat de fluxdichtheid van de stator en de rotor ongeveer 90° gefaseerd is, waardoor de positie van de rotor veilig wordt vastgelegd. Hiervoor worden meestal Hall-sondes, een opto-elektronisch systeem of een magneto-resistief systeem gebruikt.

Borstelloze gelijkstroommotoren hebben niet alleen extra vermogens-elektronische wikkelingen, maar maken ook gebruik van nieuwe permanente magnetische materialen, zoals neodymium-ijzer-borium en samarium-kobalt, hoewel deze laatste nog relatief duur zijn.

De nieuwste geavanceerde oplossing komt van de Magnet Motor Company, met een eenvoudige constructie, uitstekende elektrische parameters en een compact gewicht en formaat. Deze motor behoort tot de groep elektronische commutatie van synchrone motoren met permanente bekrachtiging. Bij alle elektromotoren is het bereikte koppel evenredig met de magnetische inductie in de luchtspleet, de axiale lengte van de rotor en het kwadraat van de luchtspleetstraal. Het ontwerp van de buitenrotor is voordelig omdat het moment afhangt van de straal van de luchtspleet in het kwadraat. Hij is samengesteld uit geperste laminaten met afzonderlijke, tangentieel gemagnetiseerde magneten met wisselende polariteit (neodymium-ijzer-borium), waardoor er geen roterende elektrische delen zijn. Binnenin bevindt zich een stator, die is samengesteld uit geperste elektrische platen en hoogpolige spoel dragers vormt. De spoelen zijn verbonden met de uitgang van de vermogens-elektronica, die de stromen in de statorwikkeling commuteert, zodat de motor zich gedraagt als een gelijkstroommotor met externe bekrachtiging. Dit is de zogenaamde elektronische commutatie. De regeling is eenvoudig en feilloos over het gehele toerentalbereik tot $n = 0$. Om de vertienvoudiging van het vermogen in vergelijking met conventionele elektromotorontwerpen aan te kunnen, wordt de statorwikkeling met vloeistof gekoeld. Bovendien is de motor tot vier keer lichter en kleiner dan het conventionele ontwerp.



links: rotor - rotorverband, laminaten, magneet

midden: magnetische flux, transformatorplaten, magneet - vermogenselektronica - stator - spoel, drager, laminaten

rechts: 1-draads, 2-stator, 3-rotor, 4-lagers

Plaatje 8 - Schema en doorsnede van de motor van Magnet-Motor company

3.1.6 SAMENVATTING

DC-motoren worden gebruikt vanwege de gemakkelijke snelheidsregeling en de geschikte dynamische eigenschappen, maar zij leveren minder goede prestaties en hebben een lager energierendement, vergen meer onderhoud en zijn duurder.

Voordelen van gelijkstroommotoren:

- technisch volwassen
- gewoon gecontroleerd
- kosteneffectief

Nadelen van gelijkstroommotoren:

- commutator en borstels zijn gevoelig voor defecten en moeten worden onderhouden
- de maximale omtreksnelheid wordt door de rotatiefrequentie beperkt tot ongeveer 7000 min-

1

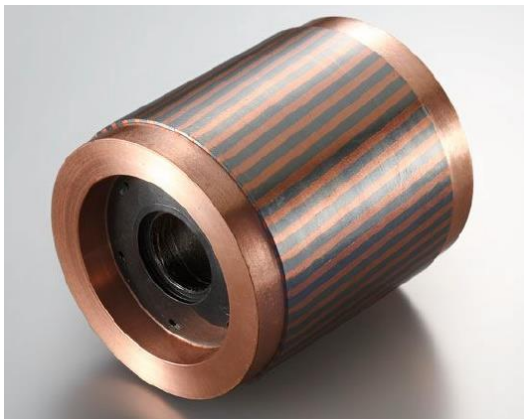
lager rendement en vermogensdichtheid in vergelijking met wisselstroommotoren Voor de regeling van alle voorgaande typen elektromotoren wordt gebruik gemaakt van elektronische regeling van de voeding van de motorwikkeling met behulp van siliciumthyristors met een rechthoekige spanningscurve. De gewenste gemiddelde stroomwaarde wordt ingesteld door de frequentie en de amplitude te wijzigen. Een verhoging van de veldbetrachting is voldoende voor het remmen binnen

het bereik van de veldregeling. Hierdoor stijgt de motorspanning boven de batterijspanning, waardoor energie via diodes naar de batterij kan worden teruggevoerd.

3.2 AC (WISSELSTROOM) MOTOREN

AC-motoren vervangen in toenemende mate DC-motoren in elektrische voertuigen. Het grote voordeel van wisselstroommotoren ten opzichte van gelijkstroommotoren is dat er geen stroom hoeft te worden toegevoerd aan de draaiende rotor, aangezien deze wordt aangeslagen door het roterende magnetische veld. De krachten van het magnetisch veld werken op het anker en drijven het aan tot draaien door het effect van de geïnduceerde stroom. AC-motoren worden ingedeeld in asynchrone motoren en synchrone motoren, naargelang de rotor met een andere snelheid of synchroon met het draaiveld van de stator draait.

4.2.1 ASYNCHRONE MOTOR



Koolborstels - Wikkelen - Ringen

Plaatje 9 - Kooi en ringrotor van een asynchrone motor

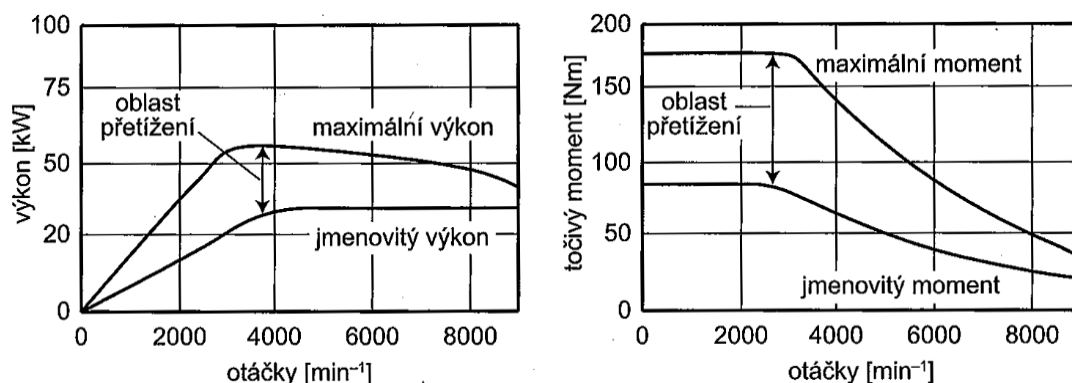
Het essentiële voordeel van de driefasen asynchrone motor is de afschaffing van de commutator. De stator is samengesteld uit lamellen, omdat er een in de tijd variërende magnetische flux doorheen gaat. Op de polen of groeven wordt een driefasige statorwikkeling geplaatst. De rotor kan worden uitgevoerd als kooi of ring. De kooirotor is samengesteld uit dikke aluminium, bronzen of koperen staven die op een korte manier met elkaar verbonden zijn, met laminaten die het inwendige vullen. De ringrotor is voorzien van een wikkeling waardoor de door borstels en ringen van buitenaf gevoede stroom vloeit. Bij dit ontwerp bevinden de weerstanden zich achter de rotorwikkelingen, waardoor de bedrijfsomstandigheden kunnen worden gewijzigd. Bij asynchrone motoren wordt de magnetische flux aan de stator geleverd door de veldwikkeling, maar met een roterende spanning van variabele amplitude en frequentie, die moet worden afgeleid van de gelijkspanning van de tractiebatterij. De

gelijkstroom uit de accu moet dus worden omgezet in wisselstroom. door het cyclisch inschakelen van thyristoren, waardoor de rechthoekige golfvorm ongeveer verandert in een sinusvormige.

De statorwikkeling bestaat uit ten minste drie bundels, 120° van elkaar gedraaid, en wordt gevoed door driefasige wisselstroom. Een ander alternatief zijn $3n$ bundels (n is een geheel getal), van elkaar gescheiden door een hoek van $120^\circ/n$. Deze wikkeling produceert een roterend magnetisch veld met een cirkelvormige frequentie van de wisselstroom ω , of voor n bundels met een cirkelvormige frequentie ω/n , wat betekent dat het ruimtelijk roteert ten opzichte van de motorbehuizing.

Vergeleken met een gelijkstroommotor is een asynchrone motor aanzienlijk kleiner en lichter bij hetzelfde vermogen, zodat een vermogen/gewichtsverhouding van ongeveer 1 kg/kW kan worden verwacht. Bovendien heeft de motor een eenvoudiger ontwerp, is hij robuust, onderhoudsvrij, kan hij zwaar worden overbelast en kan hij tot 20.000 RPM bereiken.

Zowel de frequentie als de spanning moeten variabel zijn om de trekkracht en de motorsnelheid te regelen. Om aan deze regelingseisen te voldoen zijn hoge kosten voor het stroomcircuit nodig. Het terugwinnen van energie tijdens het remmen kan met hoge efficiëntie gebeuren.



Plaatje 10 - Vermogens- en koppelkarakteristieken van een asynchrone motor

3.2.1 DWARSFLUXMOTOR

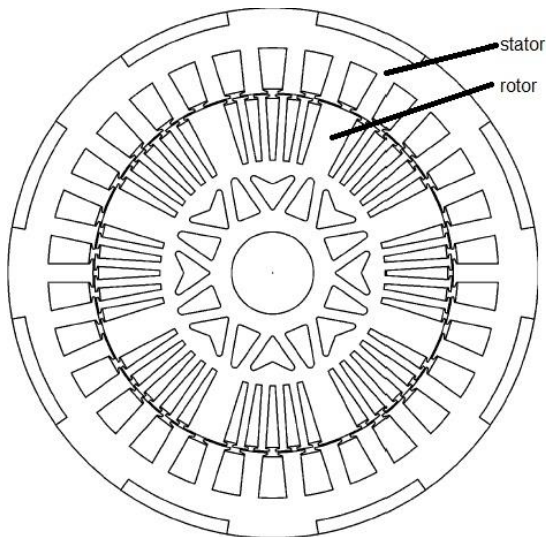
Dit is een speciaal type asynchrone wisselstroommotor, waarbij de stroom in de omtrekriching aan de rotor wordt toegevoerd en de magnetische flux van de stator niet loodrecht op de as van de rotor staat, maar er parallel aan loopt.

3.2.2 SYNCHRONE MOTOR

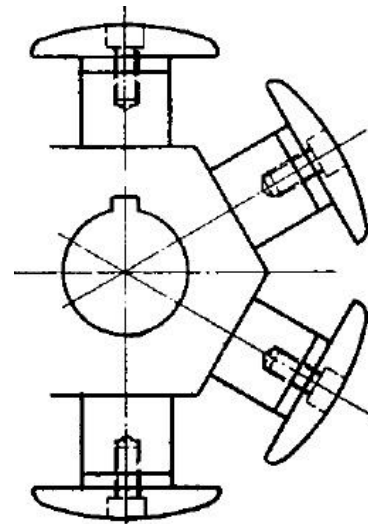
Bij synchrone motoren valt de cirkelfrequentie samen met het circulerende magnetische veld. Er zijn twee soorten synchrone motoren op basis van de methode van rotoropwekking, namelijk die met een opwindingswikkeling en die met permanente magneten. Bij de eerste is de rotor voorzien van een wikkeling die met gelijkstroom wordt gevoed. De rotor kan glad of met opvallende polen zijn.

Het voordeel van dit ontwerp is dat een groot bereik van constant maximumvermogen wordt bereikt door de variatie van de gelijkstroom.

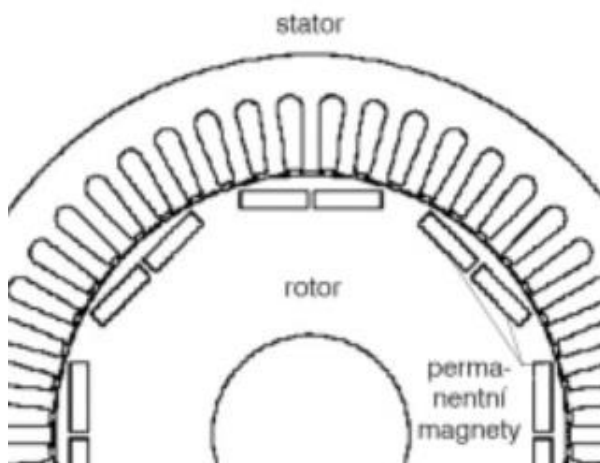
Bij permanent bekrachtigde synchrone motoren wordt het magnetische veld in de rotor bekrachtigd door permanente magneten, waardoor geen extra elektrische energie nodig is. Het voordeel van dit ontwerp is de geringe omvang en het hoge rendement.



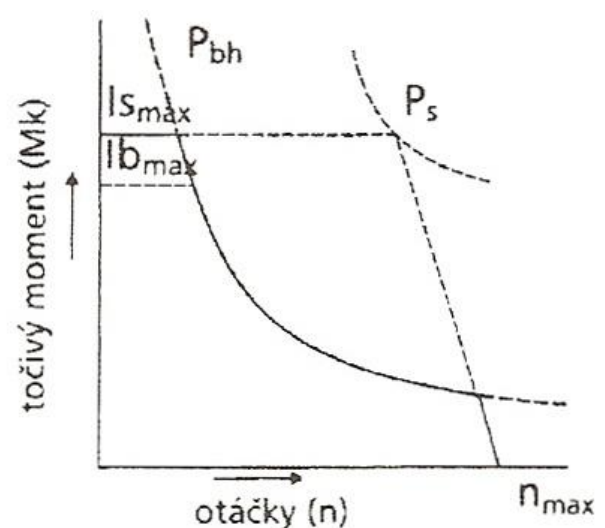
Plaatje 10 - Gladde rotor



Plaatje 11 - Uitstekende polen (aandelen)



Plaatje 12 - Synchrone machine met permanente magneten



Plaatje 13 - Koppelkarakteristiek van een synchrone motor

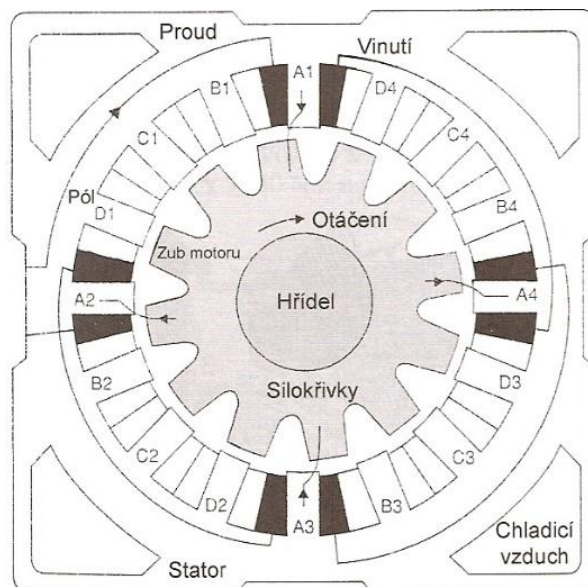
3.2.3 Gecontroleerde reluctantiemotor

Reluctantiemotoren zijn gebaseerd op de reeds lang bekende techniek van reluctantiestappenmotoren, waarbij gebruik wordt gemaakt van veranderingen in de magnetische

geleiding afhankelijk van de positie van de rotor. Hoewel reluctantiestappenmotoren gemakkelijk en goedkoop kunnen worden geproduceerd, worden zij al vele decennia beperkt gebruikt vanwege hun niet-uniformiteit, wat betekent dat het koppel afhangt van de rotorpositie. Dit nadeel kan worden ondervangen door een passende regeling.

Er zijn twee hoofdtypen van reluctantiemotoren: één die gebaseerd is op het principe van een synchrone machine met salinerende polen en de andere die geschakelde reluctantiemotor wordt genoemd en die gebaseerd is op een elektromechanische omvormer. Het eerste type is een synchrone machine zonder veldwikkeling en een rotor die is aangepast om de magnetische geleiding zoveel mogelijk te variëren. Geschakelde reluctantiemotoren zijn uniek omdat zij, in tegenstelling tot andere elektrische machines, niet kunnen functioneren zonder hulp van elektronische circuits. Afhankelijk van de gebruikte besturingsmethode kunnen zij werken in stapmodus of continue rotatiemodus."

Een reluctantiemotor is een speciaal type wisselstroommotor. Er zijn eenvoudige spoelen op de stator die worden gevoed door een spanning van één polariteit. De rotor heeft geen veldwikkeling of schuifcontacten. De rotor van zacht ijzer heeft tandwielvormige pooluitbreidingen.



Plaatje 14 - Gecontroleerde reluctantiemotor

Het principe is dat nadat er stroom in de overeenkomstige spoelen is ingevoerd, de rotor zodanig wordt afgesteld dat het magnetische circuit een minimale magnetische weerstand heeft. De snelheid en het koppel van de reluctantiemotor kunnen zeer goed worden beïnvloed door vermogenselektronica. Een reluctantiemotor start asynchroon en loopt dan synchroon.

Het begrip reluctance verwijst naar de magnetische weerstand die de rotor in het magnetische veld vertegenwoordigt. Door de massaloze tandopeningen in de rotor heeft de rotor van de reluctantiemotor een zeer klein traagheidsmoment en dus zeer hoge acceleratiemogelijkheden.

Voordelen van reluctantiemotoren:

- hoog koppel bij lage snelheden
- hoog rendement

- robuuste constructie
- lage onderhoudskosten
- stabiele werking van de motor wanneer een of meer fasen uitvallen
- hoge overbelastbaarheid en lage warmteproductie
- hoog rendement en gunstige prijs

Nadelen van reluctantiemotoren:

- het koppel is niet gelijkmatig (pulserend koppel)
- hogere geluidsemissies
- het stelt hoge eisen aan de besturings- en vermogensonderdelen bij hoge snelheden

3.2.4 SAMENVATTING

Voordelen van AC-motoren:

- technisch perfect
- compacte en robuuste constructie en daardoor onderhoudsvrij
- hoge snelheden mogelijk maken
- hebben een even hoog rendement als gelijkstroombmotoren

Nadelen van AC-motoren:

- veeleisende controles
- hogere prijs

De volgende tabel vergelijkt de meest voorkomende elektrische tractiemotoren en, zoals te zien is, zijn alle genoemde typen geschikt voor het aandrijven van voertuigen, met name synchrone motoren. De beste vervulling van het gegeven kenmerk wordt beoordeeld met het cijfer 10.

motor	cena	účinnost	hmotnost	rozsah Pkonst	přetížitelnost	spolehlivost	stav vývoje
stejnoseměrný	10	7	6	10	10	7	10
asynchronní	8	8	6	9	10	9	9
synchronní	8	10	7	10	10	9	8
transversální	7	10	8	8	10	10	7
řízený reluktanční	9	6	7	4	10	9	5
stejnoseměrný bez kartáčů	8	10	10	8	9	10	8

DC - asynchrón - synchrón - dwars - gecontroleerde reluctance - borstelloze DC

prijs - efficiëntie - gewicht - bereik van constant vermogen - overbelastbaarheid - betrouwbaarheid - technische maturiteit

Tab.: Vergelijking van verschillende concepten van elektrische tractiemotoren

3.3 VRAGEN AAN HET EINDE VAN HET HOOFDSTUK:

1. Uit welke onderdelen bestaat een gelijkstroombmotor?
2. Hoe worden gelijkstroombmotoren ingedeeld volgens de aansluiting van de bekrachtigingswikkeling?
3. Wat zijn de voordelen van gelijkstroombmotoren?
4. Wat zijn de nadelen van gelijkstroombmotoren?
5. Wat betekent de term asynchroon?
6. Wat betekent de term synchroon?
7. Hoe kan de rotor van asynchrone motoren worden gemaakt?
8. Wat zijn de voordelen van een asynchrone motor ten opzichte van gelijkstroombmotoren?
9. Hoe kan de rotor van synchrone motoren worden gemaakt?
10. Wat is een reluctantiemotor?
11. Wat zijn de voordelen van reluctantiemotoren?
12. Wat zijn de voordelen van borstelloze motoren?

4 VOERTUIGEN OP WATERSTOF

DOELSTELLINGEN :

Dit hoofdstuk dient uitsluitend ter informatie om de technische parameters van verschillende typen waterstofvoertuigen te vergelijken.

TREFWOORDEN:

tanken, bereik, prestaties

Waarom voertuigen op waterstof gebruiken in plaats van alleen elektrische?

Het grote voordeel van waterstof ten opzichte van zuiver elektrische energie ligt in de aanzienlijk kortere tanktijd.



Plaatje 15 - Tanken van waterstof (bron: <https://media.daimlertruck.com/>)

4.1 DE JAPANESE TOYOTA MIRAI IS EEN IN MASSA GEPRODUCEERDE AUTO OP WATERSTOF

Waterstof voor de aandrijving van auto's kan worden geproduceerd uit verschillende primaire bronnen, waardoor het een veelbelovend alternatief is voor de huidige energiebronnen. Toyota combineert met zijn Fuel Cell System (TFCS) gepatenteerde brandstofceltechnologie met Toyota FC Stack en hogedrukwaterstoftanks met hybride technologie. Dit systeem heeft een veel hogere energie-efficiëntie dan verbrandingsmotoren.

In vergelijking met EV's is de tanktijd veel korter, ongeveer 3 minuten. Een ander verschil tussen waterstofenergie en verbrandingsmotoren is dat er geen CO₂-uitstoot is. De rijkwaliteit is vergelijkbaar met die van andere auto's.

4.1.1 RIJPRESTATIES (TOYOTA-GEGEVENS NOVEMBER 2014)

Voertuig	Rijbereik	Ongeveer 550 km Geschat, volgens NEDC-cyclus
	Maximale snelheid	178 km/u
Brandstofcel stapel	Volume vermogensdichtheid	3,1 kW/L (wereldtop)
	Maximaal vermogen	114 kW (155 DIN-pk)
	Aantal tanks	2

Hogedruk waterstoftank	Nominale werkdruk	70 MPa (700 bar)
	Tankopslagdichtheid	5,7 wt% (wereldtopniveau)
Motor	Maximaal vermogen	113 kW (154 DIN-pk)
	Maximaal koppel	e 335 Nm

Afmetingen / zitplaatsen

Lengte		4890 mm
Breedte		1815 mm
Hoogte		1535 mm
Gewicht		1850 mm
Wielbasis		2780 mm
Spoor (voor / achter)		1535 mm / 1545 mm
Minimale bodemvrijheid		130 mm
Binnenmaten	Lengte	2040 mm
	Breedte	1465 mm
	Hoogte	1185 mm
Zitplaatsen		4

4.2 EEN ANDERE IN MASSA GEPRODUCEERDE AUTO OP WATERSTOF IS DE HYUNDAI NEXO

Hyundai is een van de eerste massaproductanten van waterstofauto's. Hun auto heet NEXO en is de eerste SUV die op waterstofcellen rijdt. Hyundai is erin geslaagd een auto te ontwikkelen met een prachtige maximale actieradius van 666 km, een tank die slechts 5 minuten nodig heeft om te tanken en een vermogen van 120 KW. Het systeem van drie gekoppelde waterstoftanks maakt dankzij de compacte afmetingen een beter gebruik van de interne ruimte mogelijk. De Hyundai Nexo werd ontwikkeld om koude temperaturen tot -30°C te weerstaan en werd getest in zware omstandigheden om te garanderen dat hij ook in winterse omstandigheden kan presteren.

Gewicht van het voertuig	1,8 ton
Brandstofcel	135 kW
Snelheid	180 km/u
Maximaal bereik	600 km
Remmen	hydraulisch systeem
Tank (waterstofcapaciteit)	700 bar (6,33kg)

4.3 WATERSTOFBUS SOLARIS URBINO 12

Deze bus werd geïntroduceerd in Stockholm op 9-12 juni 2019 tijdens UITP Global Public Transport Summit.

De Solaris Urbino 12 Hydrogen is een zero-emissie bus aangedreven door een waterstof brandstofcel. Hij heeft een bereik van 350 km en behoudt toch alle voordelen van elektrische energie. De bus wordt gekenmerkt door een zeer laag geluidsniveau en de afwezigheid van trillingen tijdens het rijden. Het enige product dat bij de chemische reactie in de waterstofcel ontstaat, is water. De tanktijd bedraagt slechts enkele minuten, wat de flexibiliteit van het voertuig garandeert.

Motor	elektrische portaalas ZF AVE130 2x125 kW
Waterstof brandstofcel	70 kW
Tractie batterijen	leeuw
Waterstoftanks	samengestelde tanks 5x312 l
Laadsysteem	plug-in

4.4 WATERSTOFBUS ŠKODA H'CITY 12

De waterstofbus van Škoda Group heeft een maximale actieradius van 350 km. Hij wordt gekenmerkt door een extreem laag geluidsniveau en weinig trillingen, een comfortabel interieur en een korte tanktijd. Dat alles draagt bij tot een ongeëvenaard comfort voor de passagiers en de chauffeur.

Lengte	12 020 mm
Breedte	2 550 mm
Hoogte	3 430 mm
Zitplaatsen	26-30
Aantal passagiers	tot 85
Bereik	tot 350 km
Waterstofopslagcapaciteit	39 g

4.5 HYUNDAI HFC BUS

Werd in 2018 ontwikkeld voor het vervoer van bezoekers en personeel op de Olympische en Paralympische Spelen Tokyo 2020.

Gewicht van het voertuig	15 ton
Type brandstofcel	200 kW
Snelheid	103 km/u
Tanken en rijden	400 km
Remmen	hydraulisch systeem
Tank (hoeveelheid waterstof)	350 bar (40kg)

4.6 DE WATERSTOFTREIN VAN DEUTSCHE BAHN

Siemens Mobility ontwikkelt op verzoek van de Deutsche Bahn een nieuwe generatie waterstoftrein Mireo Plus H die in de fabriek in Krefeld zal worden gebouwd. Het is een van de meest milieubewuste stappen in de overgang naar emissievrij treinvervoer. De Mireo Plus H haalt reikwijdtes tot 800 km. Het vermogen van deze locomotief ligt op hetzelfde niveau als dat van de elektrisch aangedreven locomotieven. Zijn belangrijkste troeven zijn het hoge tractievermogen van 1,7 MW, een maximale acceleratie van $1,1 \text{ m/s}^2$ en een maximumsnelheid van 160 km/u. De driedelige treinconfiguratie heeft een maximaal bereik van 1000 km.

4.7 VRAGEN AAN HET EIND VAN HET HOOFDSTUK:

1. Wat is het bereik van de tanktijden voor auto's?
2. Welke actieradius kunnen auto's hebben?
3. Welke druk wordt gebruikt bij het vullen van auto's en vrachtwagens op waterstof?