

Modelleringsniveaus in elektrische auto's

Simulatie van elektrische auto's vereist verschillende niveaus voor de modelvorming. Peter van Duijsen van Caspoc bespreekt drie modelleringsniveaus die nodig zijn in het ontwerp van de aandrijving in een elektrische auto: het concept op systeemniveau, de aandrijving op circuitniveau en de elektrische motor op componentniveau.

Sommige mensen denken wellicht dat het voor een elektrische aandrijving in elektrische auto's volstaat om een DC-motor met loodaccu te gebruiken. Simpel toch? Nou nee, vergeet het maar. Het is helaas een stuk gecompliceerder. Dat heeft alles te maken met vermogen en een beperkte energieopslag in de auto. Natuurlijk, je kunt het eenvoudig houden met een loodaccu en DC-motor, maar dan heb je wel een aanhangwagen voor die accu's nodig en je zult waarschijnlijk op het fietspad moeten snorren. De eisen zijn namelijk behoorlijk hoog, ook al omdat we verwend zijn. Een afstand van zeshonderd kilometer afleggen zonder te tanken, dat is wat we gewend zijn. Als je dat elektrisch wilt doen, moet je wel wat meer uit de kast halen.

moet je een keuze maken tussen een puur elektrische auto of een hybride auto. Een puur elektrische auto heeft alleen een elektromotor voor de aandrijving. De energie hiervoor komt uit de batterij die met een lader wordt opgeladen, ofwel thuis uit het stopcontact ofwel onderweg aan een laadpaal (waarvan er overigens nog niet zo veel zijn). Zo'n plug-inauto kan intern ook een kleine verbrandingsmotor met generator hebben om de batterij op te laden. Op dit moment handig, want je kunt nog steeds benzine kopen.

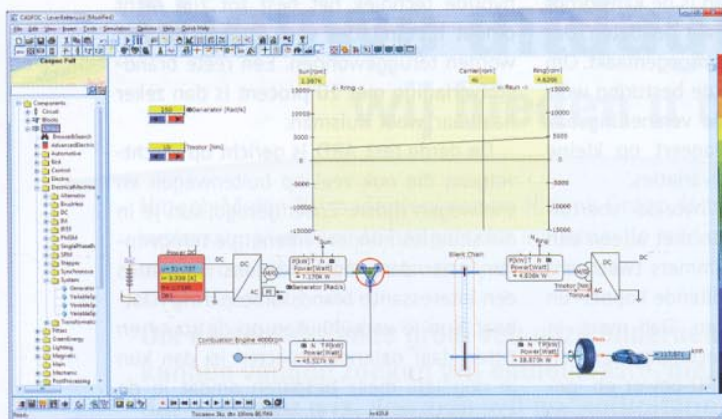
De andere variant, die tegenwoordig veel rondrijdt, is de hybride elektrische auto. Zo'n wagen bevat naast de verbrandingsmotor ook (meestal twee) elektrische motoren. Die werken samen

Hefboom

Tijdens het ontwerp van elektrische auto's zijn simulatietools nodig. Er zijn verschillende niveaus voor het modelleren: op systeemniveau, op een elektrisch circuitniveau en op gedetailleerde componentenniveaus. Afhankelijk van de ontwerpfase wordt gekozen voor een simulatieniveau.

In Figuur 1 is een simulatiemodel van het aandrijfsysteem van een hybride auto weergegeven. Dit model is op systeemniveau. De drie motoren – verbrandingsmotor, elektrische generator en elektrische motor – zijn via een planetaire tandwielkast met elkaar verbonden. Een elektrische generator houdt de verbrandingsmotor op een constant toerental, terwijl de elektrische motor extra aandrijfkoppel toevoert aan de wielen. Alle energie die de elektrische generator opwekt om het toerental van de verbrandingsmotor te regelen, wordt via de batterij weer naar de elektrische motor geleid.

Figuur 1 toont ook het lever-diagram, een hefboom die de verhouding tussen de toerentallen van de drie motoren weergeeft. Met behulp van deze systemsimulatie kunnen we inzichtelijk maken hoe de elektrische motoren in toerental moeten worden geregeld voor iedere snelheid van de auto. Tevens leert deze simulatie ons wat de vermogensbalans van de auto is en kunnen we de grootte en het maximale toerental van zowel de motor als de generator schatten.



◀ **Figuur 1: Het concept van een elektrische aandrijving voor een auto is met abstracte modelvorming inzichtelijk te maken. Een lever-diagram maakt de regeling van toerentallen van de generator en koppel van de motor zichtbaar. De vermogensbalans en batterijlaadstroom zijn in conceptfase snel te simuleren.**

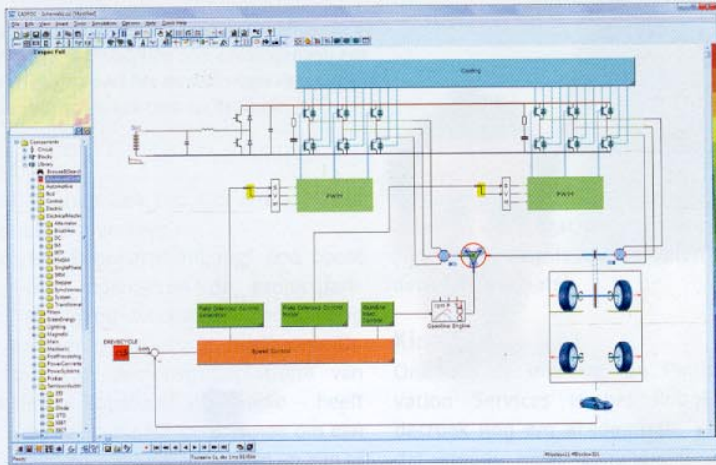
Er zijn twee hoofdcomponenten in een elektrische auto die erg belangrijk zijn. De batterij voor de energieopslag en de elektrische motor met vermogenselektronica die zo efficiënt mogelijk moet zijn. Op die batterij zullen we in dit artikel niet al te diep ingaan, behalve de vermelding dat die volgens de huidige technologie standaard lithium bevat en peperduur is. Voor een beetje energieopslag betaal je al gauw tussen de tien- en twintigduizend euro.

Zit er in een elektrische auto dan 'gewoon' een elektrische motor? Ook hier ligt het wat gecompliceerder. Als eerste

met de verbrandingsmotor en regelen zowel de snelheid van de auto als het toerental van de verbrandingsmotor. De belangrijkste eigenschap van de hybride elektrische auto is dat de verbrandingsmotor praktisch altijd met een optimaal toerental draait. Hierdoor is hij veel efficiënter dan een conventionele auto. Het bijkomende grote voordeel is dat de elektrische motoren tevens de snelheid van de auto regelen. Eigenlijk is een hybride auto gewoon een automaat, maar dan wel een met een hele slimme automatische versnellingsbak, die tevens remenergie in een batterij kan opslaan.

Rotorblik

De volgende stap in het ontwerp van een elektrische auto is een meer gedetailleerde simulatie van het elektrische circuit en de regeling van de twee elektrische motoren. In Figuur 2 zijn het elektrische circuit en de twee elektrische motoren met regeling in een hybride auto op circuitniveau weergegeven. Hier kunnen we de regeling van de motoren ontwerpen en de vermogenselektronica van de inverter dimensioneren. Zaken als pulsbreedtemodulatie, veldgeoriënteerde regeling van de motoren, verliezen in de halfgeleiders en invloed van schakeltijden op harmoni-



< **Figuur 2:** In een multifysische simulatie wordt de gehele elektrische aandrijving van de batterij tot aan het wiel opgenomen. Regeling, gedetailleerd motormodel en temperatuurafhankelijke verliezen in de vermogenselektronica spelen een belangrijke rol in het bepalen van het energieverbruik van de aandrijving.

schen komen aan bod. Dit niveau is eigenlijk multifysisch omdat elektrische, mechanische en thermische grootheden samen met een digitale regeling in één simulatie zijn gevangen.

Enkele componenten in de aandrijving moeten nog in detail worden ontworpen. Hieronder vallen de opbouw van de vermogenselektronische inverters, de keuze van de batterijen, de koeling van de inverters en de elektrische motoren zelf. Met name dat laatste is een vak apart, sommigen noemen het zelfs bijna een kunst. Het lijkt in eerste instantie toch zo eenvoudig: de stroom door de motor regelen en je kunt de snelheid van de auto aanpassen. Ja en nee. De motor moet inzetbaar zijn voor zowel lage als hoge toerentallen, lage verliezen hebben en ook bij hoge toerentallen nog koppel kunnen leveren. Bovendien moet de motor compact en licht zijn.

De oplossing is een synchrone permanente-magneetmotor. Die heeft de hoogste energiedichtheid van alle bestaande motoren. Nadeel is wel de kostprijs van de permanente magneten. Met name de prijs van de legering neodymium, ijzer en boor (NdFeB), de meest gebruikte materiaal-

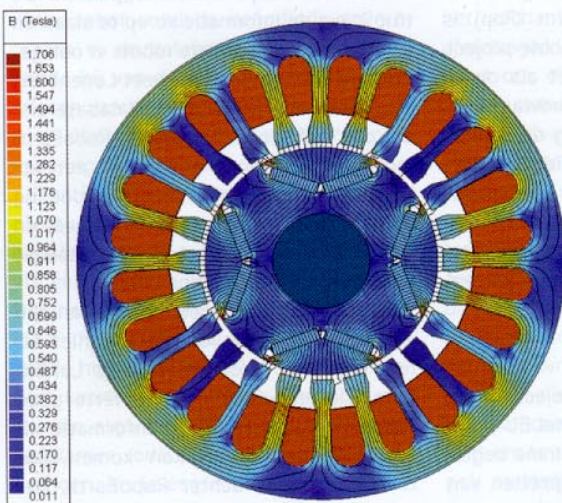
soort voor elektrische auto's, is vanwege haar zeldzaamheid erg hoog.

Het ontwerp van zo'n motor gebeurt in eindige-elementensoftware zoals weergegeven in Figuur 3 op componentniveau. In deze illustratie is te zien hoe de veldlijnen van de permanente magneten door de stator lopen. De geometrie van de rotor en de stator moet zo worden gemaakt dat de motor een maximaal koppel kan genereren, maar ook dat zijn opgewekte spanning onder die van de DC-link blijft. Daarbij komt dat de motor niet te veel in de verzadiging mag komen, omdat je anders geen koppel overhoudt.

Een mechanische eis aan de rotor is dat deze de magneten moet vasthouden. Daarvoor zijn in het rotorblik sleuven aangebracht waarin de magneten worden geschoven. Aan de buitenrand van de rotor is het rotorblik ter plekke van de magneten erg dun; net dik genoeg om de magneet vast te houden, maar dun genoeg om in verzadiging te gaan. Die verzadiging is nodig, want in feite is hier een kortsluiting van het magnetische veld van de permanente magneet aanwezig en dat heeft een reductie van het motorkoppel tot gevolg. Optimalisatie van het rotorblik is dus een belangrijke ontwerpfactor.

Galliumnitride

Het uiteindelijke motorontwerp in eindige elementen levert de parameters op voor het motormodel in Figuur 2. Zodra de elektrische motor en elektrische generator zijn gedimensioneerd en we de parameters in de simulatie hebben ingevoerd, kunnen we de efficiency van het gehele systeem simuleren. Nu komt het erop aan de verliezen in de halfgeleiders te minimaliseren.



▲ **Figuur 3:** Met eindige-elementensoftware kun je bekijken hoe de veldverdeling in een synchrone permanente-magneetmotor is en wat zijn maximale koppel is.

Deze zijn afhankelijk van de stroom door de motor, dus ook indirect van de regeling van de motor en generator. Belangrijk is dat de juiste temperatuur in simulatie kan worden berekend. Aandacht voor de koeling van de vermogenselektronica is dus een belangrijk punt.

De regeling van de motor en generator vormen een essentieel onderdeel van de gehele simulatie. De regeling is verantwoordelijk voor bijvoorbeeld de gas toevoer naar de verbrandingsmotor, maar ook voor het aansturen van de elektrische motor en generator, afhankelijk van de gewenste snelheid van de auto. De veldgeoriënteerde regeling voor de generator en motor zorgt ervoor dat onafhankelijk van de snelheid en positie van de rotor, er altijd een optimaal koppel wordt gegenereerd voor een minimale stroom. Deze zogeheten MTPA (*maximum torque per ampere*) maakt dat de driefasemotor als een simpele DC-motor te besturen is. In een simulatie laat je deze auto volgens een *drive cycle* rijden. Dit betekent dat de snelheid van de auto gedurende een bepaalde tijd (bijvoorbeeld 1200 seconden voor de New European Drive Cycle) voorgeschreven is.

Wat kunnen we in de toekomst van elektrische auto's verwachten? Hybride of puur elektrisch? Een aantal dingen staat vast. De batterij is duur maar er wordt momenteel erg veel onderzoek naar gedaan. Door toepassing van nieuwe halfgeleidermaterialen als siliciumcarbide en galliumnitride zal de vermogenselektronica waarschijnlijk efficiënter worden.

De keuze voor de elektrische motor en generator staan nog ter discussie. Ook de klassieke asynchrone motor en de geschakelde reluctantiemotor zijn serieuze kandidaten, vooral vanwege de zeldzaamheid van het magneetmateriaal NdFeB. Er zijn dus verschillende mogelijkheden voor het ontwerp van elektrische auto's.

Simulatie is een belangrijk hulpmiddel om alle bestaande concepten te bestuderen en virtueel te testen. Vergelijking van simulatieresultaten geeft inzicht in het gedrag en energieverbruik van de auto. Juist dat energieverbruik wil je als ontwerper zo laag mogelijk houden, zodat de auto ook daadwerkelijk geproduceerd en verkocht kan worden.

Peter van Duijsen is R&D-manager bij Caspoc, dat simulatiesoftware ontwikkelt voor mechatronische systemen.

Redactie Alexander Pil