

Motorbesturing

hoe de complexiteit van motorbesturing wordt gereduceerd



Stuart Cording (Elektor)

De elektromotor vindt zichzelf voortdurend opnieuw uit om te voldoen aan de eisen van nieuwe toepassingen, van elektronisch speelgoed en huishoudelijke apparaten tot elektrisch gereedschap en elektrische voertuigen. Even belangrijk zijn echter de diverse elektronische besturingsoplossingen die daarmee hand in hand gaan om die toepassingen mogelijk te maken. Integratie was de sleutel tot de ontsluiting van de maximale prestaties van elektromotoren. In de jaren '70 zorgde de geïntegreerde H-brug voor een revolutie in de consumentenelektronica zoals videorecorders. Tegenwoordig zorgen geoptimaliseerde microcontrollers met speciale motorbesturingsfuncties voor een efficiënte werking met borstelloze motoren

Kleine DC-borstelmotoren met permanente magneet zijn bijna overal te vinden. Vaak FHP-motoren (fractional horsepower) genoemd, komen we de meeste tegen in auto's en huishoudelijke apparaten. Dankzij het voortdurend toenemende comfort worden in auto's niet alleen ruitenwissers en ventilatoren maar ook spiegels, ramen en zonnedaken, deuren en (verstelbare) stoelen met elektromotoren bediend. De betreffende DC-motoren kunnen elektrisch eenvoudig worden aangestuurd, ook al bieden ze niet het hoogst denkbare rendement. Dit soort motoren wordt nog altijd veelvuldig toegepast, behalve voor toepassingen die continu in bedrijf zijn, zoals pompen en ventilatoren,

waarvoor een efficiëntere borstelloze motor-technologie wordt ingezet.

Aansturing van eenvoudige DC-borstelmotoren

De stator van eenvoudige DC-motoren met permanente magneten is hol; meestal treffen we daarin twee magneten aan. Op de rotoras in het midden bevindt zich het anker met de wikkelingen. Deze worden aangesloten op een commutator op de rotoras. Koolborstels, meestal onderdeel van de kap die op de stator is gemonteerd, zorgen ervoor dat de elektrische stroom de wikkelingen kan bereiken (figuur 1). De positie van de commutator op de as

is van cruciaal belang voor een optimale efficiëntie. Idealiter moet de positie van de commutatorborstel, bekend als het commutatievlak, het mogelijk maken dat het magnetische veld dat wordt gegenereerd door de rotorwikkelingen loodrecht op het magnetische veld van de stator staat. Tijdens bedrijf beweegt dit vlak echter door vervormingen in het magnetische veld van de stator. Voor de eenvoud is een commutatievlak gekozen dat het hoogste rendement biedt bij een specifieke rotatiesnelheid.

Nu de commutatie van de motor mechanisch is opgelost, hoeven alleen snelheid en draairichting elektrisch te worden geïmplementeerd. Wanneer het alleen om de snelheid gaat, is een pulsbreedtegemoduleerd (PWM) signaal samen met een geschikt gedimensioneerde vermogenscomponent zoals een MOSFET, alles wat nodig is (figuur 2). De meeste microcontrollers (MCU's) bezitten een timerschakeling die na configuratie een PWM-signaal kan genereren zonder regelmatige tussenkomst van de processor. In zulke gevallen verdient een N-kanaal MOSFET als low side-schakelaar de voorkeur, omdat diens gate doorgaans direct kan worden aangestuurd (in low power-applicaties). Als high-side schakelen nodig is, moet een N-kanaal MOSFET worden gebruikt in combinatie met een MOSFET-driver die de vereiste gatespanning [1] genereert.

Snelheid controleren en richting regelen

Voor de snelheidsregeling heeft de gebruikte regelkring het actuele toerental van de motoras nodig. Een mogelijke benadering is het gebruik van een optische sensor samen met een kamwiel dat op de rotor is bevestigd. In een digitaal besturingssysteem kan de periode tussen de signalen van de detector worden omgerekend in omwentelingen

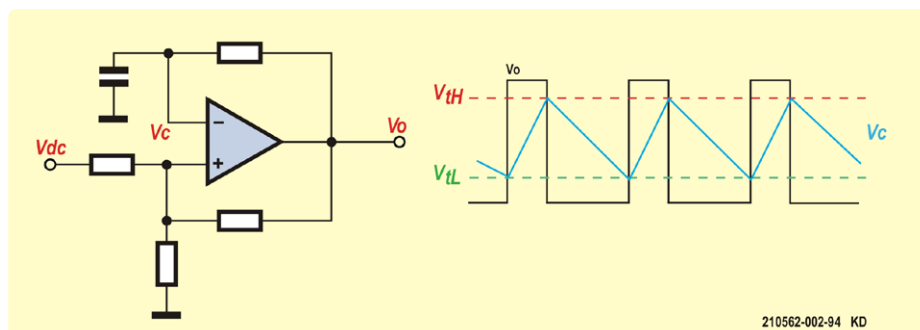
per minuut (rpm). De meeste MCU's hebben ook een invoerschakeling die timerwaarden kan vastleggen op de stijgende en dalende flank van een signaal. Hun resolutie hangt af van de kloksnelheid van de timer en moet hoog genoeg zijn om bruikbare gegevens te leveren bij de hoogste rotatiesnelheden. De uitvoer van dit blok gaat naar een PID-regelalgoritme (proportioneel, integrerend, differentiërend) [2] dat de puls/pauze-verhouding van de PWM wijzigt om de ingestelde motorsnelheid aan te houden (**figuur 3**).

Zulke op een rotor gemonteerde sensoren blijken vaak te duur voor de beoogde applicatie. In plaats daarvan kan de tegen-EMK van de motor, die evenredig is met diens snelheid, worden gebruikt. Deze is meer dan nauwkeurig genoeg voor de meeste toepassingen. Tijdens de fasen van de PWM-regeling waarbij de vermogensschakelaar is uitgeschakeld, kan de tegen-EMK direct op de motorklemmen worden gemeten. Aangezien de meeste microcontrollers ook over een A/D-omzetter (ADC) beschikken, is dit doorgaans zeer economisch. Hardware-implementatie van deze benadering vereist slechts een paar weerstanden om de spanning te begrenzen tot het ingangsbereik van de ADC. Complexer is de software-implementatie. De ADC-meting moet worden gesynchroniseerd met het uitschakelen van de MOSFET en vereist een korte extra vertraging om de spanning tot rust te laten komen (**figuur 4**). Voor MCU's die zijn ontworpen met motorbesturing in het achterhoofd, zal er waarschijnlijk een hardwarekoppeling mogelijk zijn tussen de PWM-uitgang en de ADC-trigger, evenals een vertragingsschakeling, waardoor deze meetbenadering kan worden geautomatiseerd.

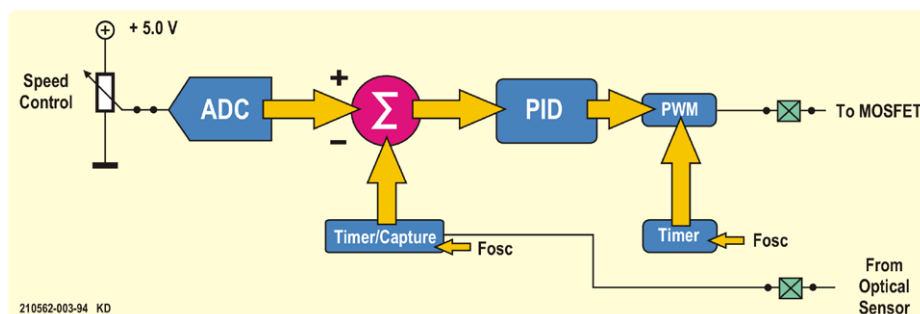
Nu we de elementen voor de motorsnelheidsregeling onder handbereik hebben, moet alleen de draairichting nog worden geregeld. De H-brug (**figuur 5**) maakt gebruik van vier vermogensschakelaars waarmee de polariteit van de voeding die op de motorklemmen wordt aangelegd, kan worden omgewisseld (ofwel Q2 en Q3 ofwel Q1 en Q4). Het kortsluiten van de motorklemmen via het bovenste of onderste paar schakelaars kan worden gebruikt als een elektrische rem om de rotorsnelheid te reduceren. De snelheidsregeling wordt ook hier geïmplementeerd met behulp van een PWM-sig-naal naar een of



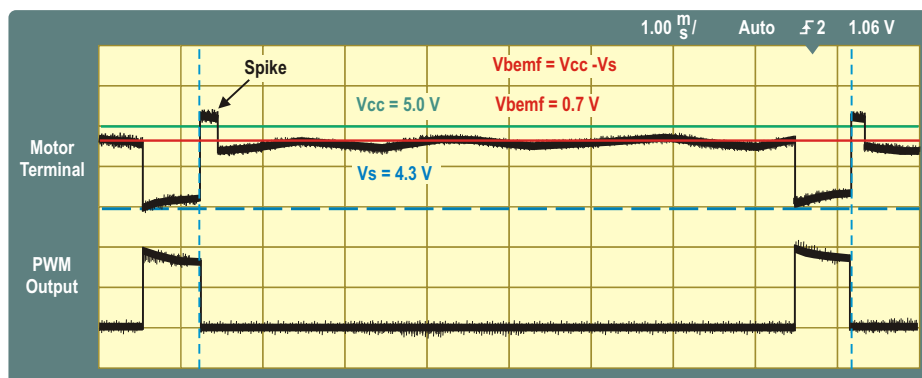
Figuur 1. De onderdelen van een FHP DC-motor. De commutator is duidelijk te zien op de rotoras naast de ankerspoelen (bron: Shutterstock/Pixel Enforcer).



Figuur 2. PWM-generator op basis van een operationele versterker.



Figuur 3. Het signaal van een sensor die op de rotor van de motor is bevestigd, kan worden gebruikt om timerwaarden vast te leggen. Deze worden gecombineerd met het ingestelde toerental en doorgegeven aan de PID om het motortoerental te regelen (bron: Microchip Technology).



Figuur 4. Nadat de MOSFET is uitgeschakeld, verschijnt een kleine spanningspiek op de motorklemmen. Een ADC-meting moet wachten tot de tegen-EMK zich heeft gestabiliseerd (bron: Precision Microdrives).

beide MOSFET's. Er moet echter worden opgemerkt dat er kans is op kortsluiting als zowel de high-side als de low-side MOSFET's tegelijkertijd worden ingeschakeld.

De meeste grote chipfabrikanten hebben sterk geïntegreerde H-brug-oplossingen in de aanbieding die eenvoudig kunnen worden gebruikt en die een groot aantal beveiligings- en diagnosefuncties bieden. De IFX9201SG [3] van Infineon is zo'n IC, geschikt op stromen tot 6 A en bedoeld voor motorbesturing in industriële toepassingen. Het IC kan worden aanbestuurd met behulp van algemene I/O's en een PWM-sigitaal, om het motor-toerental en de draairichting te regelen. Tegelijk biedt een SPI-interface toegang tot de diagnostische registers. Deze geven feedback over kortsluiting naar de voeding of massa, open belastingscondities of

onderspanning. Indien gewenst kunnen de regeling van de snelheid en draairichting worden omgeschakeld naar besturing via SPI in plaats van via de richtings- en PWM-ingangen. Het risico van een onbedoelde kortsluiting van de H-brug wordt zo geëlimineerd en verdere beveiligingsfuncties, zoals oververhitting en overstroom, zijn inbegrepen. Wie snel een prototype van een ontwerp wil bouwen, kan de H-Bridge Kit 2Go [4] aanschaffen die kan worden geïntegreerd in de DAVE-ontwikkelomgeving van Infineon.

Optimalisatie van de PID-regelaar

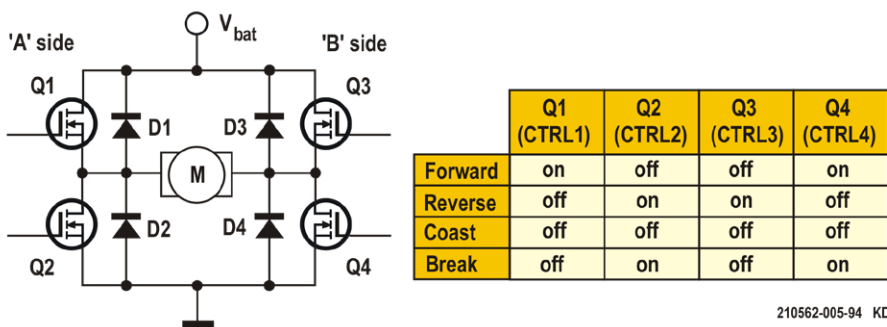
De selectie van een MCU die niet te duur is voor de toepassing zal vaak resulteren in een 8-bit exemplaar. Helaas staan dergelijke MCU's niet bekend om hun rekenprestaties.

Dit maakt het lastig om een PID-regelaar te implementeren die snel reageert op veranderingen van het ingestelde toerental of variaties in de belasting. Om dit aan te pakken, hebben sommige PIC-MCU's een speciale PID-versneller (**figuur 6**) met een 35-bit-accumulator aan boord, zoals de PIC16F1619 van Microchip. Met behulp van de standaard s-domein PID-vergelijking worden drie constanten – K_1 , K_2 en K_3 – naar de moduleregisters geschreven voordat het gewenste instelpunt wordt geschreven en de PID-rekenmodule wordt ingeschakeld. De PID-module reduceert het aantal benodigde klokcycli tot 9 (vergeleken met ongeveer 1.000 bij een software-PID op dezelfde MCU [5]).

De voordelen van BLDC en PMSM

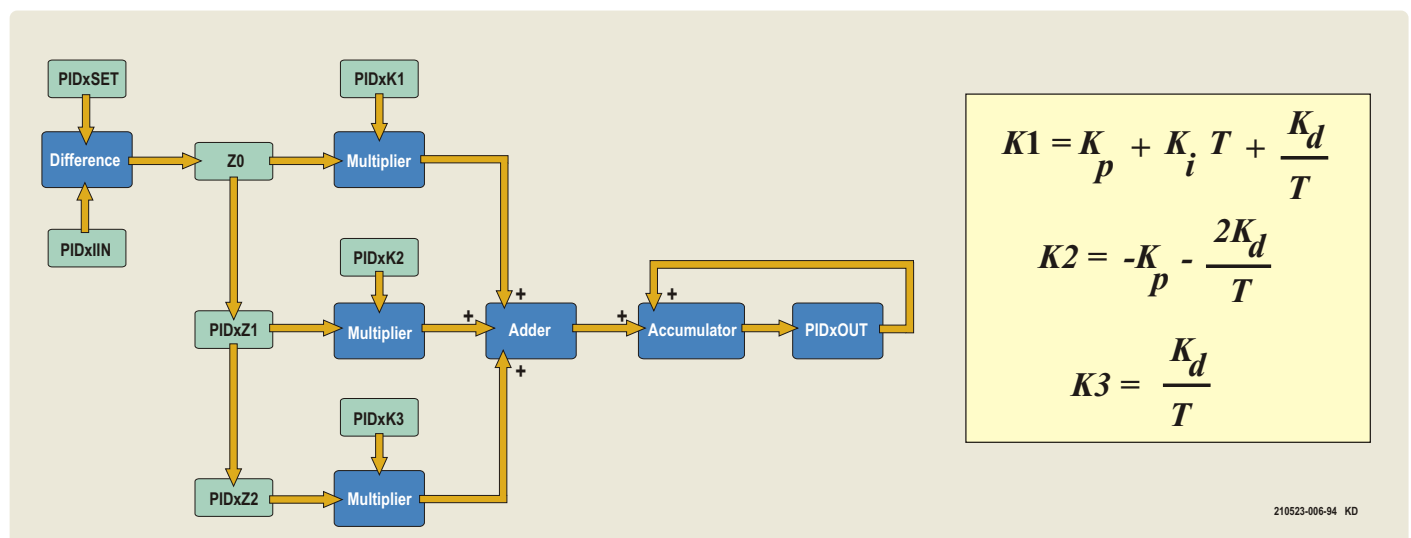
Hoewel de eenvoud van FHP-gelijkstroommotoren aantrekkelijk is, dwingen steeds meer andere ontwerpfactoren, zoals efficiëntie, geruisloosheid en vermogensdichtheid toepassingen in de richting van borstelloze gelijkstroommotoren (BLDC) en permanentmagneet-synchroommotoren (PMSM). Wanneer ze optimaal worden aangedreven, zijn BLDC en PMSM veel efficiënter en dankzij de stroomvoerende wikkelingen in de stator is afvoer van de warmte eenvoudiger.

BLDC- en PMSM-motoren kunnen worden gezien als binnenstebuiten gekeerde FHP DC-motoren. De spoelen die voor de commutatie worden gebruikt, zijn op de stator (het motorhuis) gewikkeld, terwijl



210562-005-94 KD

Figuur 5. H-brugschakeling met tabel die beschrijft hoe de aansturing van de schakelaars de draairichting bepaalt. Het is ook mogelijk de motorklemmen kort te sluiten om een elektrische rem te implementeren (bron: Microchip Technology).



210523-006-94 KD

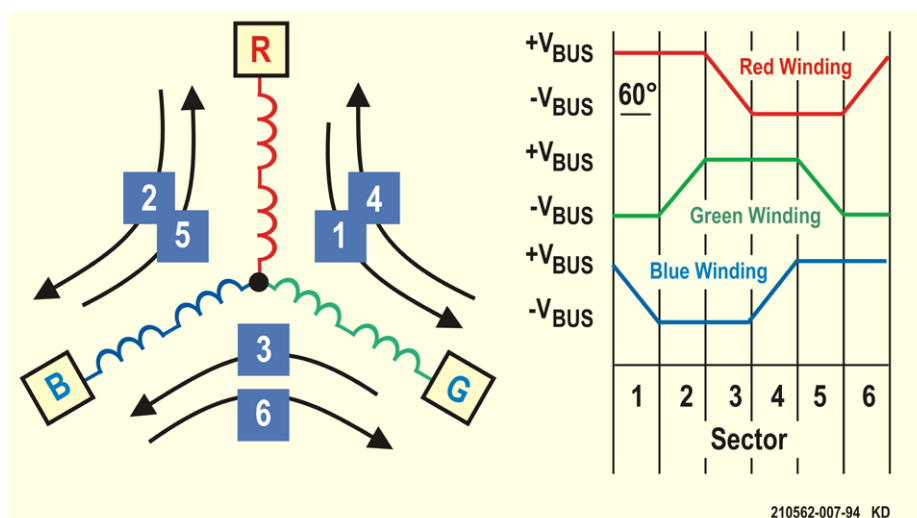
Figuur 6. Het PID-blok van de PIC16F1619 samen met de vergelijkingen om de drie standaard-constanten te berekenen (bron: Microchip Technology).

de magneet om de rotor is aangebracht. Dit zorgt voor lichte rotoren met weinig traagheid. Er is echter geen mechanische commutatie geïmplementeerd; dit wordt aan de ingenieur overgelaten die de applicatie ontwikkelt. Het belangrijkste verschil tussen de twee motortypen is dat BLDC-motoren een tegen-EMK genereren met een trapesiumvormig verloop, terwijl de commutatie minder veeleisend is dan bij PMSM-motoren, die een sinusvormig commutatie-verloop hebben en een sinusvormige tegen-EMK genereren. PMSM-motoren zijn overigens geruislozer dan BLDC-motoren.

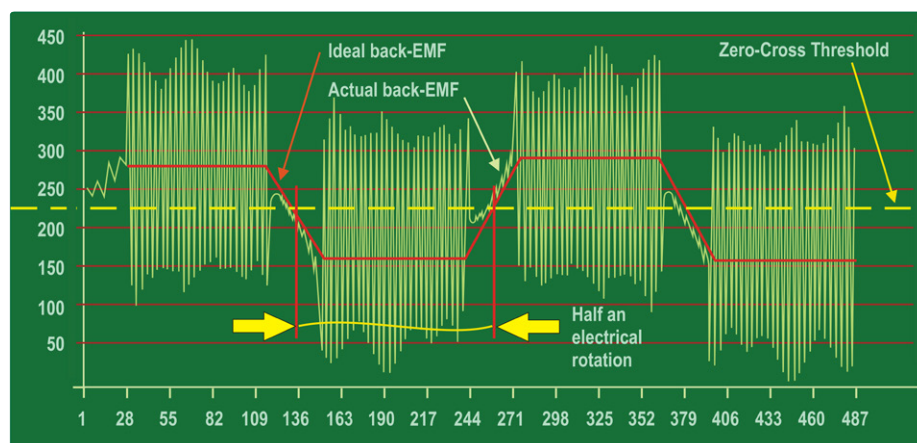
De windingen zijn typisch stervormig gerangschikt. Er zijn dan zes halve bruggen nodig om de spoelen van een BLDC-motor te bekrachtigen in een patroon van zes stappen waarbij telkens twee van de drie spoelen stroom krijgen (**figuur 7**). Er ontstaat dan een magnetisch veld dat rond de stator draait; de rotor kan niet anders dan dit volgen, waaruit de gewenste mechanische draaiing resulteert. Door de volgorde van het commutatiepatroon om te keren, verandert de draairichting van de rotor. Hoewel dit eenvoudige model van BLDC-functionaliteit de bediening duidelijk maakt, worden de motorwindingen in de praktijk meestal zo gewonden dat meerdere elektrische rotaties nodig zijn voordat een volledige mechanische omwenteling is bereikt.

Sensorloze bepaling van rotorhoek

De volgende uitdaging is het bepalen van de positie van de rotor om ervoor te zorgen dat het volgende commutatiestap op het juiste moment wordt uitgevoerd. Bij veel BLDC-motoren zijn Hall-sensoren geïntegreerd die de rotorhoek redelijk nauwkeurig aangeven. De stijgende en dalende flanken van dergelijke sensoren kunnen worden gekoppeld aan veel MCU's met flankgetriggerde interrupts, waardoor de juiste aansturing van de motorspoelen eenvoudig kan worden geïmplementeerd in interruptroutines. Dergelijke signalen kunnen ook worden ingelezen in een timer/teller om de rotatiesnelheid te bepalen en een PID-regelaar aan te sturen. Het motor-toerental wordt ook geregeld met behulp van PWM-uitgangen. Dus hoewel de commutatie van dergelijke motoren een klus voor de ontwerper van de applicatie



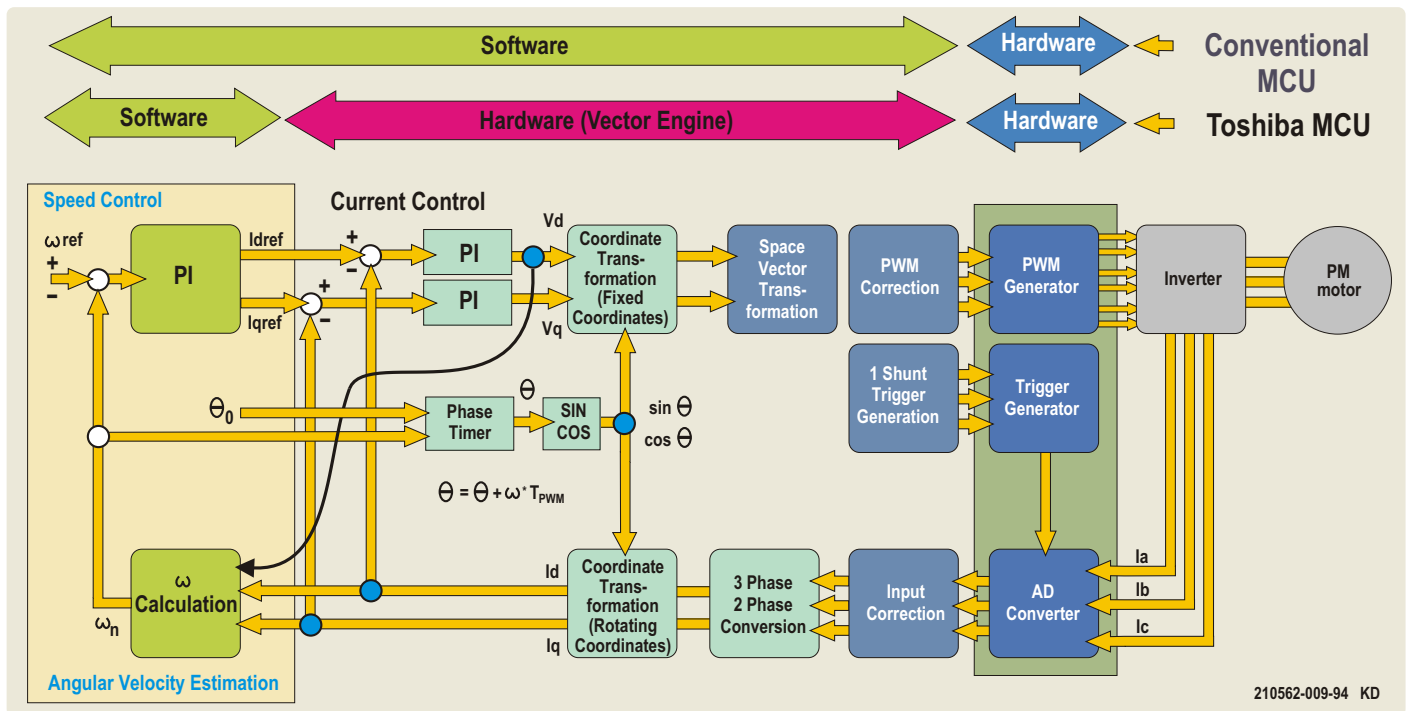
Figuur 7. BLDC-motor met stervormig gerangschikte windingen, en de commutatiestappen voor een enkele elektrische omwenteling. Voor een mechanische omwenteling kunnen meerdere elektrische omwentelingen nodig zijn (bron: Microchip Technology).



Figuur 8. De tegen-EMK van de open fase kan worden gemeten en gebruikt om de hoekrotatie te bepalen, waardoor een Hall- of andere sensor niet nodig is (bron: Microchip Technology).

is, verschilt de aanpak niet zo veel van het gebruik van DC-borstelmotoren. Zoals al opgemerkt, verhogen sensoren de onderdelenkosten, en er is misschien niet eens plaats om ze te monteren. Net als DC-borstelmotoren genereren BLDC-motoren ook een tegen-EMK. Hier kan dat signaal echter worden gebruikt om de rotorpositie te bepalen. Zodra de tegen-EMK van de niet-stroomvoerende fase de betreffende drempel overschrijdt (de helft van de momentane voedingsspanning), kan de rotorhoek worden bepaald door de tijd tussen deze nuldoorgangen te bepalen (**figuur 8**).

In theorie klinkt dat alles niet zo ingewikkeld, maar de praktische implementatie is een ware uitdaging. Ten eerste genereren motoren bij stilstand geen tegen-EMK. Dat vereist een manier waarbij ze op een dusdanige snelheid worden gebracht dat een algoritme een voldoende sterk tegen-EMK-signaal heeft om te meten. Ook kan de code die nodig is om de tegen-EMK-data te filteren en te evalueren bij de uitvoering veel tijd nodig hebben. Dit kan tot gevolg hebben dat er tussen verschillende algoritmen en commutatiebenaderingen moet worden omgeschakeld als de motor tussen lagere en hogere snelheden wisselt. Leveranciers



Figuur 9. Sterk geïntegreerde motorbesturingsmodules, zoals Toshiba's Advanced Vector Engine Plus, maken een quasi-autonome regeling van permanente magneet-motoren mogelijk (bron: Toshiba Electronics Europa).

van intelligente BLDC-motorbesturingen hebben veel van deze problemen opgelost, waardoor een nieuwe motor kan worden geïnstalleerd en 'aangeleerd' door deze aan een motorcontroller zonder veel input van de ontwerpingenieur aan een motorcontroller te koppelen.

Implementatie van een sinusvormige motorbesturing

PMSM-algoritmen voor motorbesturing hebben een extra complexiteitsniveau. Hier moeten namelijk de PWM's van de MCU continu worden gemoduleerd om een sinusvormig uitgangssignaal te genereren dat de motorwikkelingen bekrachtigt. Dergelijke benaderingen gebruiken veldgeoriënteerde besturing (field-oriented control, FOC), waarbij de stromen van de driefase-wikkelingen worden gebruikt om de actuele rotorhoek te bepalen. Met behulp van Clarke/Park-transformaties streeft deze regelmethode te allen tijde naar een hoek van 90° tussen de magnetische velden van de rotor en de stator, waardoor op elk moment een maximaal koppel wordt bereikt.

Hoewel een dergelijke complexiteit op sommige MCU's in software kan worden geïmplementeerd, hebben veel fabrikanten



Met zoveel complexiteit concentreren de marktleiders op het gebied van motorbesturing zich op het vereenvoudigen van hun oplossingen, zodat ontwikkelaars zich kunnen concentreren op het creëren van bijzondere functionaliteit in hun toepassingen.

speciale hardware-modules ontwikkeld die een groot deel van de complexiteit automatiseren. Een voorbeeld wordt gevormd door de TXZ4A+ MCU's van Toshiba [6]. Deze Arm Cortex-M4-IC's zijn voorzien van een Advanced Vector Engine Plus

(A-VE+)-module die nauw is gekoppeld aan de PWM- en ADC-modules (figuur 9). In de A-VE+ module zijn de volledige driefasige naar tweefasige en omgekeerde Clarke/Park-transformaties geïmplementeerd in hardware, waarvoor alleen een PI-controller en hoeksnelheidsschatting en wat huishoudelijke taken in software nodig zijn. De rest van de tijd werken de modules quasi-autonoom samen.

Innovatie in motorbesturing stimuleren

Met zoveel complexiteit concentreren de marktleiders op het gebied van motorbesturing zich op het vereenvoudigen van hun oplossingen, zodat ontwikkelaars zich kunnen concentreren op het creëren van bijzondere functionaliteit in hun toepassingen. Volgens Jonas P. Proeger, Director Business Management bij Trinamic, nu onderdeel van Analog Devices (figuur 10), gaat het voornamelijk om het verbeteren van het rendement, het verminderen van geluid en het vergroten van intelligentie. Rendementsverbeteringen zijn nodig om het groeiende aantal op accu's werkende autonome voertuigen, zoals Autonomous Mobile Robots (AMR's) die in de logistiek worden gebruikt, te ondersteunen. De



Figuur 10. Jonas P. Proeger, Director Business Management bij Trinamic, inmiddels onderdeel van Analog Devices (bron: Analog Devices)

gebruikte motoren veranderen ook, met grotere vermogensdichtheid en geringer gewicht, wat resulteert in motoren met een lagere inductantie. Als gevolg hiervan moeten de algoritmen voor de motorbesturing veranderen, met regelkringen die werken tot 100 kHz. IC's zoals de TMC4671 [7] bereiken dit met behulp van speciale hardware die de plaats inneemt van alternatieve benaderingen die DSP's of FPGA's vereisen. Stille werking wordt ook steeds belangrijker want biedt een hogere waargenomen kwaliteit in vergelijking met alternatieve producten met luidruchtige motoren en vertragingen. Hier benadrukt Jonas Proeger de stealthChop-technologie die een spanningsgestuurde choppertechniek gebruikt om het hoorbare geluid tot 10 dB te verminderen (in combinatie met een bipolaire stappenmotor [8]). De resulterende vermindering van de rimpelstroom vermindert ook de

vermogensdissipatie in de motor. Het laatste groeigebied betreft intelligente motoren, waar industriële installaties 'zelfbewuste' motoren nodig hebben. Zulke motoroplossingen dragen bij aan het toenemende gebruik van kunstmatige intelligentie op systeemniveau door in werkelijke tijd gegevens direct van de fabrieksvloer te leveren.

Vermogen moet geregeld worden

Het is verleidelijk te denken dat alles in de richting van BLDC- en PMSM-motoren gaat. Dat is echter niet het geval. Er blijven tal van toepassingen over waar traditionele FHP DC-motoren uitstekend voldoen. En met het grote aanbod van H-brug motor-drivers en simpele MCU's met slimme randapparatuur is het duidelijk dat de halfgeleiderindustrie ook nog veel potentieel ziet. Omdat toepassingen echter gericht zijn op een steeds hogere efficiëntie, de overstap op accuvoeding verlangen of zo geruisloos mogelijk moeten zijn, zullen ontwerpers BLDC en PMSM onder de knie moeten krijgen. Hoewel veel van de technieken die worden gebruikt om DC-motoren te besturen nog steeds actueel zijn, moet worden opgepast voor de valkuilen rond de fijnere aspecten van de implementatie van de controller. Een solide theoretische basis blijft nuttig en maakt het mogelijk om besturingsoplossingen te debuggen. Maar om tijd te besparen, is het zinvol om gebruik te maken van de ervaring van experts op dit dynamische gebied en de sterk geïntegreerde halfgeleideroplossingen te overwegen die de markt te bieden heeft. ◀

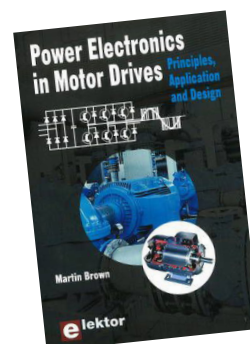
210562-01

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via stuart.cording@elektor.com.

Een bijdrage van

Idee en tekst: Stuart Cording
Redactie: CJ Abate
Illustraties: Patrick Wielders
Vertaling: Eric Bogers
Layout: Harmen Heida



GERELATEERDE PRODUCTEN

➤ E-book: Power Electronics in Motor Drives (SKU 18517)
www.elektor.nl/18517

WEBLINKS

- [1] C. Valens, "How to Choose Between High-side and Low-side Switching," Elektor, augustus 2019: <https://bit.ly/3H38uA5>
- [2] "Understanding PID Control, Part 1: What Is PID Control?," The MathWorks, Inc., mei 2018: <https://bit.ly/3CZfcor>
- [3] Infineon IFX9201SG productpagina: <https://bit.ly/3CZfEmD>
- [4] Infineon H-Bridge Kit 2GO productpagina: <https://bit.ly/3ww91FZ>
- [5] D. Hou, "PID Control on PIC16F161X by using a PID Peripheral," Microchip Technology Inc., 2015: <https://bit.ly/3DbGCHy>
- [6] Toshiba TXZ4A+ Series MCUs: <https://bit.ly/3bXUSId>
- [7] Trinamic TMC4671 productpagina: <https://bit.ly/3bWO2CA>
- [8] B. Dwersteg, "stealthChop Performance (qualitative)," TRINAMIC Motion Control GmbH & Co. KG, februari 2018: <https://bit.ly/3CZgxvt>