

Schatting van de Rotorpositie in een Permanente-Magneet-Bekrachtigde Synchrone Machine met een Positiesensor met Lage Resolutie*

ir. Hendrik Vansompel, Universiteit Gent

Promotor: prof. dr. ir. Jan Melkebeek, begeleider: dr. ir. Frederik De Belie

Sleutelwoorden: Lage-resolutie sensor, permanente-magneet-bekrachtigde machines, rotorpositieschatting, koppeling, vectorregeling, vector-volgende observer.

SAMENVATTING

In deze tekst wordt een schatting van de rotorpositie op basis van een lage-resolutie positiesensor voorgesteld. Omdat de vectorsturing van een a.c. permanente-magneetbekrachtigde synchrone machine een schatting van de rotorpositie met voldoende hoge resolutie vereist, wordt het lage-resolutie sensorsignaal getransformeerd tot een ruimtelijk gediscrètiseerde roterende vector. Een vector-volgende observer berekent op basis van deze vector de corresponderende hoge-resolutie rotorpositie. De implementatie van een basisversie van de vector-volgende observer topologie wordt uitgelegd. Om de fout in de positieschatting te reduceren worden vervolgens twee verbeteringen ingevoerd: snelheidsafhankelijke versterkingsfactoren in de observer en een reductie van de harmonische inhoud in de ingangsvector van de vector-volgende observer. Deze twee verbeteringen leiden tot een voldoende lage positieschattingfout. De performantie van de vector-volgende observer wordt getest met behulp van simulaties evenals experimenten in een testopstelling.

SOMMAIRE

Ce texte propose une estimation de la position du rotor basée sur un capteur de position à basse résolution. Comme le contrôle vectoriel d'une machine synchrone à aimants permanents nécessite une estimation de la position du rotor à haute résolution, le signal du capteur à basse résolution est transformé en un vecteur tournant spatialement discrétisé. Un observateur de poursuite de vecteur calcule, sur base de ce vecteur, la position du rotor avec une haute résolution. L'exécution d'une version de base de la topologie de l'observateur de poursuite de vecteur est expliquée. Pour réduire l'erreur dans la position, deux améliorations sont introduites: des facteurs d'amplification en fonction de la vitesse et une réduction du contenu harmonique dans le vecteur d'entrée de l'observateur de poursuite de vecteur. Ces deux améliorations réduisent la tolérance sur l'erreur de positionnement à un niveau suffisamment bas. La performance de l'observateur de poursuite de vecteur est testée à l'aide de simulations et de résultats d'essais sur banc.

SUMMARY

In this paper, a rotor position estimation based on a low-resolution position sensor is proposed. As vector control of an a.c. permanent-magnet synchronous machine requires the rotor position with sufficiently high resolution, the low-resolution sensor signal is transformed into a spatially quantized rotating vector and based on this vector, a vector-tracking observer calculates the corresponding high-resolution rotor position. The implementation of a basic vector-tracking observer topology is discussed. To reduce the remaining position estimation errors, two improvements are introduced: speed dependent observer gains and a reduction of the harmonic content in the input vector of the vector-tracking observer. These result in a sufficiently low position estimation error. The performance of the vector-tracking observer is studied by simulation as well as experiments on a hardware setup.

Inleiding

Omdat permanente-magneetbekrachtigde synchrone motoren (PMSM) zeer geschikt zijn voor toepassingen in de aandrijftechniek zoals hybride en elektrische voertuigen, is de interesse in deze machines de laatste jaren sterk toegenomen. De PMSMs hebben het voordeel dat ze energie-efficiënt zijn, een hoge vermogensdensiteit hebben en bovendien gemakkelijk stuurbaar zijn. De

vectorsturing van een PMSM vereist de rotorpositie om de gepaste statorstromen ten opzichte van het veld van de permanente-magneten te kunnen aanleggen. Om koppelrimpel te vermijden zijn sinusoidale stromen nodig, die slechts bekomen kunnen worden als de rotorpositie met voldoende hoge resolutie gekend is. Hiervoor

*: Dit werk werd bekroond als KBVE-prijs 'Onderzoek en ontwikkeling' 2009

worden bijna altijd hoge-resolutie sensoren zoals optische encoders en elektromagnetische resolvers gebruikt. Deze positie-opnemers zijn echter delicate en dure componenten, vereisen een aangepaste constructie van de machine en moeten dikwijls opnieuw afgesteld worden om sensorverplaatsingen tijdens gebruik te compenseren.

Deze nadelen zijn in tegenstrijd met de eisen van de industrie waar betrouwbaarheid, onderhoud en productiekosten belangrijk zijn. Daarom wordt er recent heel wat onderzoek verricht naar sensorloze technieken en lage-resolutie sensoren. Binnen de sensorloze technieken zijn er twee belangrijke richtingen: tegen-elektromotorische-kracht (EMK) en injectie van hoog-frequente signalen. De tegen-EMK techniek in [1], die gebaseerd is op de meting van de tegen-EMK van de PMSM, kan niet gebruikt worden voor het volledige snelheidsbereik van de machine, daar er geen EMF wordt geproduceerd bij zeer lage snelheden. Bij de technieken in [2] en [3] die gebruik maken van hoog-frequente signalen, wordt een hoog-frequent signaal geïnjecteerd in de machine, en de positieschatting gebeurt op basis van verschillen in de geometrie volgens q- en d-as van de rotor. Ondanks het feit dat deze methode ook bij zeer lage snelheden werkt, kan ze enkel gebruikt worden voor machines waar de verschillen in de rotor geometrie volgens q- en d-as voldoende groot zijn. Deze eigenschap maakt de techniek gebaseerd op de injectie van hoog-frequente signalen onmogelijk voor machines waar geen verschil is in de rotor geometrie volgens q- en d-as zoals PMSMs met oppervlaktmagneten.

Al geruime tijd worden lage-resolutie sensoren zoals binaire Hall-sensoren gebruikt in goedkope borstelloze d.c. aandrijvingen. In deze toepassingen volstaat een elektrische resolutie van 60° om de commutatie op de gepaste momenten te realiseren. Om het gebruik van lage-resolutie positie-sensoren toe te laten in borstelloze a.c. aandrijvingen, dient de positiemeting omgevormd te worden in een positieschatting met voldoende hoge resolutie. Om dit te bekomen, wordt in [4] een positieschatting op basis van de tegen-EMK techniek elke 60° gecorrigeerd op basis van de lage-resolutie sensorinformatie. Andere methodes steunen op extrapolatie algoritmes waar net zoals in voorgaande methode de positieschatting elke 60° wordt gecorrigeerd op basis van de lage-resolutie sensorinformatie. In [5] wordt de performantie van een nulde-orde een eerste-orde algoritme vergeleken. Beide methoden vereisen een minimale snelheid voor correcte werking. Voor het opstarten van de machine in de juiste richting en de minimaal vereiste snelheid te bereiken, wordt in [6] gebruik gemaakt van borstelloos d.c. opstart algoritme.

In deze tekst wordt de methode beschreven in [7] gebruikt, waar een roterende vector $\vec{H}_{\alpha\beta}$ wordt afgeleid op basis van de lage-resolutie sensor. Het bekomen van een positieschatting met voldoende hoge resolutie op basis van de positievector $\vec{H}_{\alpha\beta}$ wordt gedaan met behulp van een vector-volgende observer (VVO). Deze observerstructuur werd eerder gebruikt in [8] voor de sensorloze controle van een PMSM met ingebedde magneten. Nadat de bandbreedte van de vector-volgende observer is ingesteld door aanpassing van de VVO-parameters, tonen simulaties aan dat de positieschatting de discrete structuur van de positievector $\vec{H}_{\alpha\beta}$ volgt en dit vooral bij

lage snelheden. Daarom wordt in [9] de bandbreedte van de VVO snelheidsafhankelijk gemaakt door gebruik te maken van variabele versterkingsfactoren.

In [9] wordt een complex vectormodel voor de roterende vector $\vec{H}_{\alpha\beta}$ ingevoerd door gebruik te maken van een ruimtelijke Fourier transformatie. De resulterende Fourier reeks kan opgesplitst worden in een fundamentele component en een reeks hogere harmonischen. Door gebruik te maken van een extra terugkoppeling van de geschatte positie, kan de fundamentele component benaderd worden door de hogere harmonische af te trekken van de vector $\vec{H}_{\alpha\beta}$.

Door de invoering van deze twee verbeteringen wordt een positieschatting bekomen die voldoende geschikt is om de stromen te sturen en aldus lage koppelrimpel te bekomen. Tenslotte gebeurt een validatie van de simulatie-resultaten in een testopstelling met een 1.3 kW PMSM met ingebedde magneten.

Schatting van de rotorpositie met behulp van een vector-volgende observer

Het doel van de positieschatting is het sturen van de statorstromen om zo het gewenste koppel te bekomen. In [10] wordt aangetoond dat een elektrische resolutie van 90° voldoende is om de koppel- en rotatierichting te bekomen. Omdat voor een elektrische resolutie van 90° slechts 4 mogelijke sensor-toestanden bestaan, kan de positie worden vastgelegd met behulp van 2 bits.

Complex vectormodel van de discrete positievector

Op basis van de sensor-toestand wordt een discrete positievector $\vec{H}_{\alpha\beta}$ afgeleid. Afhankelijk van de resolutie van de sensor heeft $\vec{H}_{\alpha\beta}$ een verschillend aantal discrete toestanden. In het geval van een 90° elektrische resolutie worden twee binaire sensoren S_α en S_β respectievelijk op de α - en β -as geplaatst (Fig. 1(a)). De toestanden van beide sensoren worden aangeduid tussen haakjes $\vec{H}_{\alpha\beta,i}$ (S_α, S_β). Als \vec{H} een eenheidsvector is waarvan de positie ogenblikkelijk samenvalt met de rotorpositie, dan geldt het volgende: zolang dat \vec{H} zich in de sector 1 (S_1) verplaatst, bevindt zich $\vec{H}_{\alpha\beta}$ in de toestand $\vec{H}_{\alpha\beta,1}$. Op het ogenblik dat \vec{H} sector 2 (S_2) binnenkomt, treedt er een sensorovergang op en verspringt $\vec{H}_{\alpha\beta}$ van $\vec{H}_{\alpha\beta,1}$ naar $\vec{H}_{\alpha\beta,2}$.

In [9] wordt een complex vectormodel voor de roterende vector $\vec{H}_{\alpha\beta}$ ingevoerd door gebruik te maken van een ruimtelijke Fourier transformatie. De resulterende Fourier reeks van de positievector $\vec{H}_{\alpha\beta}$ met N discrete toestanden wordt gegeven door

$$H_{\alpha\beta} = e^{j(\theta-\phi)} - \frac{1}{N-1} e^{-j((N-1)\theta+\phi)} + \frac{1}{N+1} e^{j((N-1)\theta-\phi)} - \frac{1}{2N-1} e^{-j((2N-1)\theta+\phi)} + \frac{1}{2N+1} e^{j((2N-1)\theta-\phi)} + \dots \quad (1)$$

hierbij is $\phi = \frac{\pi}{N}$.

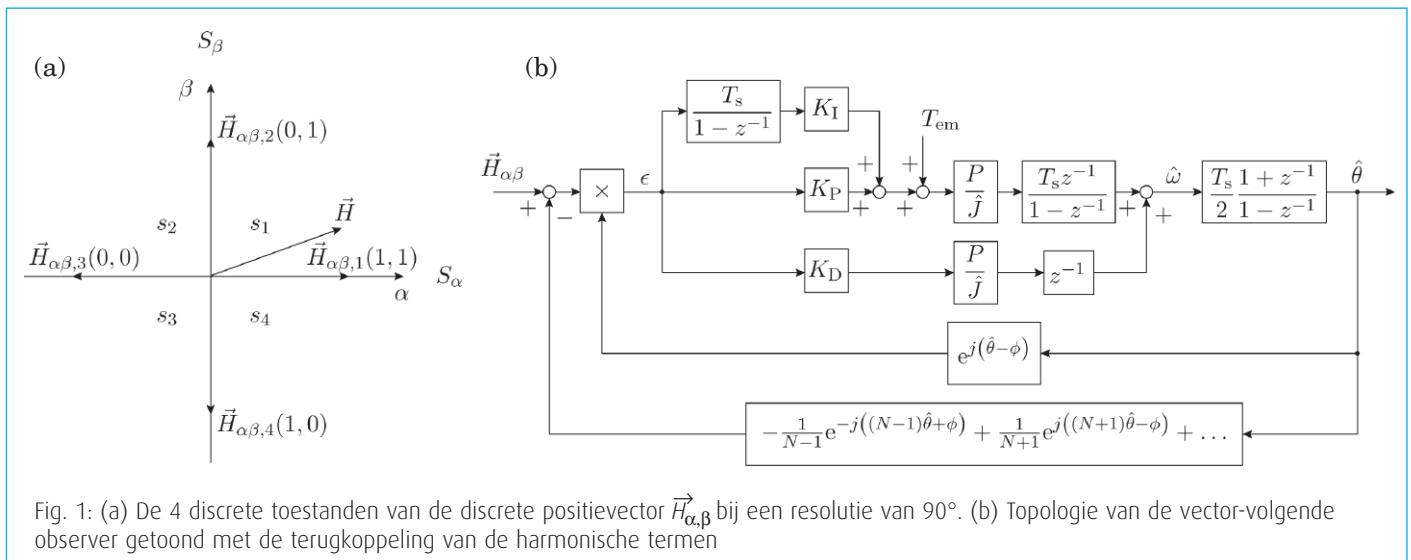


Fig. 1: (a) De 4 discrete toestanden van de discrete positievector $\vec{H}_{\alpha,\beta}$ bij een resolutie van 90° . (b) Topologie van de vector-volgende observer getoond met de terugkoppeling van de harmonische termen

De eerste term in (1) is de continue fundamentele component die op elk ogenblik gelijk is aan de ogenblikkelijke positievector \vec{H} . Alle andere termen in (1) vertegenwoordigen de ruimtelijke harmonische inhoud en geven aanleiding tot het discrete karakter van $\vec{H}_{\alpha,\beta}$.

Vector-Volgende Observer

Om een positieschatting met een hoge resolutie te bekomen, wordt een Vector-Volgende Observer (VVO) gebruikt. De VVO, die in [8] werd voorgesteld voor de sensorloze controle van een PMSM met ingebelde magneten, is voorgesteld in Fig. 1(b). Uitgaande van de koppelingang T_{em} kan op basis van het mechanisch systeemmodel de positieschatting bekomen worden. Het is echter zo dat onnauwkeurigheden in dit systeemmodel aanleiding geven tot een steeds toenemende positiefout. Om dit te voorkomen, corrigeert een proportioneel-integrerende-differentiële (PID) regelaar de positieschatting bekomen uit de koppelingang op basis van de discrete positievector $\vec{H}_{\alpha,\beta}$.

De PID-parameters worden bepaald door gebruik te maken van poolbaantechnieken toegepast op een gelineariseerd model van de VVO in het werkingpunt. Door het afstellen van de PID-regelaar, wordt de bandbreedte van de VVO bepaald. Kiest men de bandbreedte te hoog, dan zal de positieschatting het discrete karakter van $\vec{H}_{\alpha,\beta}$ volgen en dus tot grote fouten in de positieschatting leiden. Anderzijds is een voldoende hoge bandbreedte gewenst voor de systeemdynamica.

Snelheidsafhankelijke versterkingsfactoren in de observer

Het tempo waaraan de toestandsovergangen van $\vec{H}_{\alpha,\beta}$ zich voordoen is snelheidsafhankelijk, en resulteert dus in een variabele bandbreedte. Dit betekent dat voor een vaste bandbreedte van de VVO, de positieschattingfout kleiner is bij hogere snelheden, en hoger voor lage snelheden omdat de positieschatting daar het discrete karakter van $\vec{H}_{\alpha,\beta}$ volgt. Dit probleem kan opgelost worden door de bandbreedte van de VVO snelheidsafhankelijk te maken. Een mogelijkheid bestaat erin de PID-versterkingsfactoren af te stellen voor elke snelheidswaarde. Een meer praktische oplossing is de PID-versterkingsfactoren lineair met de snelheid te laten toenemen, wat

eveneens resulteert in een snelheidsafhankelijke bandbreedte. Om de werking van de VVO in open kring i.e. enkel gebaseerd op de koppelingang te vermijden, is een minimumwaarde voor de PID-versterkingsfactoren noodzakelijk.

Terugkoppeling van de harmonische inhoud

In (1) werd aangetoond dat $\vec{H}_{\alpha,\beta}$ kan opgedeeld worden in een continue fundamentele component die op elk ogenblik gelijk is aan de ogenblikkelijke positievector \vec{H} en een reeks termen die de ruimtelijke harmonische inhoud vertegenwoordigen en aanleiding geven tot het discrete karakter van $\vec{H}_{\alpha,\beta}$. Deze reeks harmonische termen is voorgesteld in Fig. 2 voor een resolutie van 90° .

Terugkoppeling van de harmonische inhoud op basis van de geschatte positie resulteert in een goede benadering van de fundamentele component: minder harmonische componenten en dus verminderen van het de discrete structuur in de positieschatting. Door de rechte flanken in de voorstelling van de harmonische termen resulteren kleine fouten in de positieschatting in grote

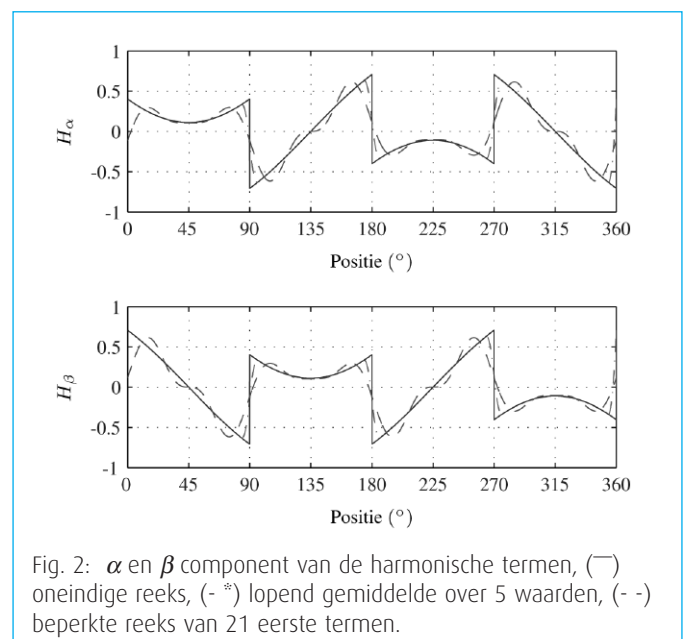


Fig. 2: α en β component van de harmonische termen, (—) oneindige reeks, (-*) lopend gemiddelde over 5 waarden, (-·-) beperkte reeks van 21 eerste termen.

afwijkingen in de benadering van de fundamentele component. Om deze afwijking te verkleinen worden de steile flanken vlakker gemaakt door slechts een beperkt aantal termen uit de Fourierreeks te beschouwen. Het afvlakken van de steile flanken kan ook gebeuren door een lopend gemiddelde te nemen van de volledige reeks harmonische termen (Fig. 2).

Simulaties

Om vergelijking tussen simulaties en metingen toe te laten, worden de parameters gebruikt voor de simulatie gelijk gekozen aan die van de testopstelling: 2 poolparen en een resolutie van 90°. Verder wordt de PID-regelaar zo afgesteld dat 0.1, 2 en 40 Hz bandbreedtes kunnen gehaald worden bij de limietsnelheid van 2500 tpm.

Simulaties worden uitgevoerd bij een lage snelheid van 10 rad/s en een hoge snelheid van 200 rad/s, gebruik makend van de basis VVO-topologie. In Fig. 3 is het discrete karakter van de positievectoren $\vec{H}_{\alpha,\beta}$ duidelijk terug te vinden in de positieschatting, wat aanleiding geeft tot grote fouten in de positieschatting. Bij hoge snelheid (Fig. 4) is het discrete karakter van $\vec{H}_{\alpha,\beta}$ veel minder uitgesproken en wordt de resulterende fout in de positieschatting veel kleiner.

Om ook bij lage snelheden een goede positieschatting te verkrijgen, worden vervolgens variabele versterkingsfactoren en een terugkoppeling van de harmonische termen ingevoerd. Om snelheidsafhankelijke versterkingsfactoren te bekomen wordt de schatting van de snelheid voorgesteld in Fig. 1(b) gebruikt. De harmonische termen werden hiertoe op voorhand bepaald als een functie van de positie door gebruik te maken van een lopend gemiddelde over 5 punten, of door slechts de 21 eerste harmonische termen te beschouwen en deze te bewaren in een tabel met 512 waarden. In Fig. 5 wordt het resultaat van een simulatie bij een lage snelheid van 10 rad/s voorgesteld. De twee verbeteringen aan de basis VVO hebben ertoe bijgedragen dat de fout in de positieschatting teruggebracht is tot 1°, wat voldoende laag is om gebruikt te worden voor vectorsturing.

Experimentele resultaten

Ten slotte werd een testopstelling gebouwd om de simulatieresultaten te verifiëren. In plaats van binaire Hall-sensoren om de posities van de magneten in de rotor te detecteren, werd ervoor gekozen een externe lage-resolutie sensor te ontwerpen die gebruik maakt van binaire optische sensoren. De magneten worden hierbij vervangen door licht doorlatende en ondoorlatende sectoren van 90° (Fig. 6). Het voordeel van deze grote externe lage-resolute sensor is dat de sensoren gemakkelijk kunnen verplaatst worden om verschillende resoluties te meten en de invloed van verkeerde sensorplaatsing te simuleren. De alternerende licht doorlatende en ondoorlatende schijf is eveneens verwisselbaar om niet-uniforme magnetevelden te simuleren.

Een 16-bit fixed point DSP met een schakelfrequentie van 8 kHz wordt gebruikt. De positieschatting bekomen uit de lage-resolutie sensor wordt vergeleken met deze

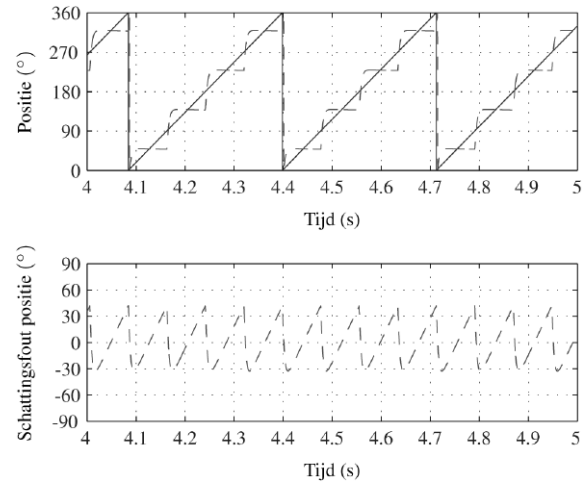


Fig. 3: Simulatie bij 10 rad/s met een VVO zonder snelheidsafhankelijke versterkingsfactoren en zonder terugkoppeling van de harmonische termen. (—) werkelijke positie, (- -) geschatte positie

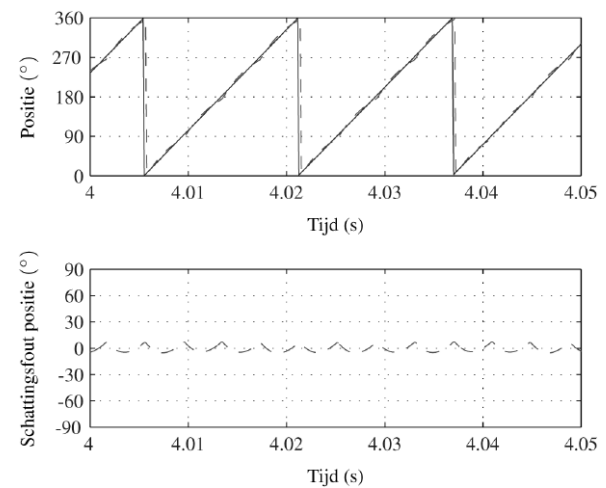


Fig. 4: Simulatie bij 200 rad/s met een VVO zonder snelheidsafhankelijke versterkingsfactoren en zonder terugkoppeling van de harmonische termen. (—) werkelijke positie, (- -) geschatte positie

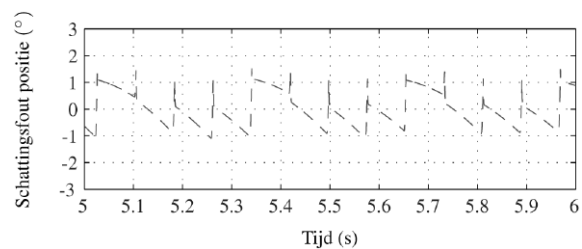


Fig. 5: Simulatie bij 10 rad/s met een VVO met snelheidsafhankelijke versterkingsfactoren en terugkoppeling van de harmonische termen.

van de hoge-resolutie encoder die in de PMSM is geïntegreerd.

Om de resultaten te kunnen voorstellen, worden de metingen uitgevoerd met een bemonsteringsperiode die een veelvoud is van de schakelfrequentie T_s . In Fig. 7 wordt de positieschattingfout in regime bij een snelheid van 10 rad/s voorgesteld. Door de inherente aanwezigheid van verkeerde sensorpositionering en niet-uniforme licht doorlatende en ondoorlatende sectoren

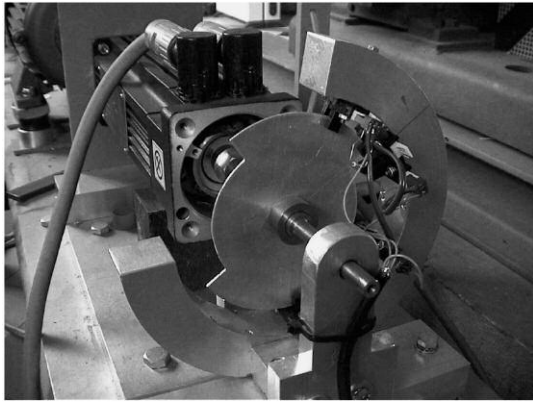


Fig. 6: Overzicht van de testopstelling: externe lage-resolutie sensor met aanpasbare sensorposities en verwisselbare schijf met licht doorlatende en ondoorlatende sectoren.

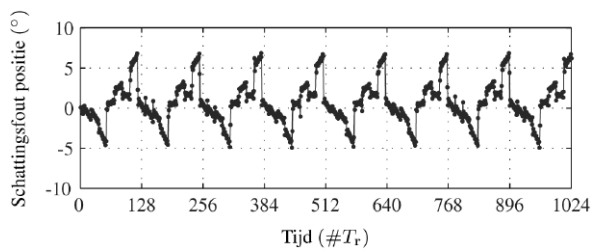


Fig. 7: Meting bij 10 rad/s met een VVO met snelheidsafhankelijke versterkingsfactoren en terugkoppeling van de harmonische termen

[11], is de fout in de positieschatting iets groter dan die van de simulaties, Fig. 5, waar een perfecte sensorconstructie werd verondersteld. De fout in de positieschatting vertoont ook een periodiciteit over twee poolparen die afkomstig is van de verschillen in de licht doorlatende en ondoorlatende sectoren waarmee de twee poolparen zijn gemodelleerd.

Conclusie

In deze tekst werd een hoge-resolutie schatting bekomen uit een lage-resolutie positievector, door gebruik te maken van een vector-volgende observer. Om de positieschatting te verbeteren bij lage snelheid werden snelheidsafhankelijke versterkingsfactoren en een terugkoppeling van de harmonische termen ingevoerd. Op die manier wordt een positieschatting bekomen die voldoende nauwkeurig is om te gebruiken voor vectorsturing en dit voor zowel lage als hoge snelheid.

Referenties

[1] H. A. Toliyat, L. Hao, D. S. Shet, and T. A. Nondahl, Position-Sensorless Control of Surface-Mount Permanent-Magnet AC (PMA) Motors at Low Speeds: IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, pp. 157-164, Feb. 2002.

[2] F. De Belie, P. Sergeant, and J. Melkebeek: Reducing steady-state current distortions in sensorless control strategies by using adaptive test pulses, Conference Record of The 23rd Applied Power Electronics Conference and exposition (APEC), 24-28 February 2008, pp. 121-126.

[3] F. Briz, M. W. Degner, P. Garcia, and R. D. Lorenz: Comparison of Saliency-Based Sensorless Control Techniques for AC Machines, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, pp. 1107-1115, Jul./Aug. 2004.

[4] A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbeni, and A. Di Napoli: SVM PMSM Drive With Low Resolution Hall-Effect Sensors, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, pp. 282-290, Jan. 2007.

[5] F. Giulii Capponi, G. De Donato, L. Del Ferraro, O. Honorati, M. C. Harke, and R. D. Lorenz: AC Brushless Drive With Low-Resolution Hall-Effect Sensors for Surface-Mounted PM Machines, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, pp. 526-535, Jan./Feb. 2008.

[6] F. Giulii Capponi, G. De Donato, and L. Del Ferraro: Brushless AC Drive Using An Axial Flux Synchronous PM Motor With Low Resolution Position Sensors, IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol. 3, pp. 2287-2292, Jun. 2004.

[7] M. C. Harke, G. De Donato, F. G. Capponi, T. R. Tesch, and R. D. Lorenz: Implementation Issues and Performance Evaluation of Sinusoidal, Surface-Mounted PM Machine Drives With Hall-Effect Position Sensors and a Vector-Tracking Observer, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, pp. 161-173, Jan./Feb. 2008.

[8] H. Kim, M. C. Harke, and R. D. Lorenz: Sensorless Control of Interior Permanent-Magnet Machine Drives With Zero-Phase Lag Position Estimation, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 39, pp. 1726-1733, Nov./Dec. 2003.

[9] T. R. Tesch and R. D. Lorenz, "Disturbance Torque and Motion State Estimation With Low-Resolution Position Interfaces Using Heterodyning Observers" IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, Jan./Feb. 2008.

[10] G. De Donato, M. C. Harke, F. Giulii Capponi, and R. D. Lorenz: Sinusoidal Surface-Mounted PM Machine Drive Using A Minimal Resolution Position Encoder, Applied Power Electronics Conference, APEC 2008, pp. 104-110, Feb. 2008.

[11] P. B. Beccue, S. D. Pekarek, B. J. Deken, and A. C. Koening: Compensation for Asymmetries and Misalignment in a Hall-Effect Position Observer Used in PMSM Torque-Ripple Control IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, pp. 560-570, Mar./Apr. 2007.

De auteur



Hendrik Vansompel is geboren in België in 1986. Hij behaalde zijn Bachelor en Master diploma in werktuigkunde-elektrotechniek aan de Universiteit Gent in respectievelijk 2008 en 2009. Momenteel is hij aan het werk als doctoraatsstudent aan het departement Elektrische Energie, Systemen en Automatisatie van de Universiteit Gent. Zijn huidige onderzoek heeft betrekking tot het ontwerpen en modelleren van elektrische machines en in het bijzonder generatoren voor kleinschalige duurzame energietoepassingen.