

Rendementsvoorspelling van een elektrische aandrijving

16 september 2016, 02:00

Pieter Beyl

In het ontwerp van machines is energieverbruik van groot belang, maar vaak moeilijk correct in te schatten. Flanders Make heeft daarom een methode ontwikkeld om het rendement van een elektrische aandrijving te voorspellen.

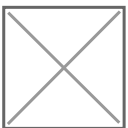
Op basis van kenplaatgegevens en additionele informatie uit datasheets wordt een verliesmodel opgebouwd van zowel motor als motor-drive (sturing), dat bruikbaar is buiten de gedocumenteerde werkingpunten. De invloed van de relevante drive-instellingen wordt mee in rekening gebracht.

Deze specifieke aanpak creëert volgende opportuniteiten:

- Het vergelijken van het energieverbruik van verschillende motor en motor drive-combinaties tijdens de ontwerpfase wordt mogelijk, en dit voor werkingpunten waarover geen documentatie beschikbaar is.
- Zo ook het evalueren van het effect van bepaalde aandrijvingsinstellingen op het totale rendement zonder gebruik te maken van metingen.
- De mogelijkheid tot integratie van de elektrische verliezen in het globale machinemodel. De impact van het gevolgde traject of de controlestrategie op het energieverbruik kan zo beter in rekening gebracht worden.

Energiezuinig ontwerp

Energieverbruik is vaak een belangrijk aspect in het ontwerp van een nieuwe machine of in de aanpassing van een bestaand ontwerp. Naast de mechanische verliezen in lagers en overbrengingen, spelen de verliezen in de elektrische aandrijving een niet te verwaarlozen rol. Het correct inschatten hiervan is niet altijd een eenvoudige opgave.



Een elektrische aandrijving en het bijhorende Sankey diagram

Bovenstaande figuur geeft een elektrische aandrijving en het bijbehorende Sankey-diagram weer. Het motorrendement hangt sterk af van het werkingpunt (toerental, koppel), alsook van de parameters ingesteld op de motor-drive. Het rendement van de motor-drive ligt typisch hoger dan dat van de motor en varieert met de drive-instellingen, en in mindere mate met het werkingpunt

van de motor.

De gegevens over motor en drive-verliezen die teruggevonden worden in de documentatie (kenplaat, datasheet, ...) zijn over het algemeen nauwkeurig, maar beperkt tot de nominale werkingscondities. Over werkingspunten die hiervan afwijken, bijvoorbeeld een hogere of lagere motorsnelheid, vindt men vaak geen informatie terug.

Het opzet van dit onderzoek (een onderdeel van het strategisch basisonderzoek in het project Multiphys ICON), is om de beschikbare nominale gegevens over drive- en motorverliezen te extrapoleren naar willekeurige werkingspunten. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een benaderend fysisch model. Dit model dient ook de invloed mee te nemen van bepaalde relevante drive-instellingen. In eerste instantie worden enkel elektrische aandrijvingen op basis van een inductiemachine beschouwd.

Meetopstelling

Een Flanders Make-opstelling met een hydrostatische aandrijflijn werd gebruikt voor het experimentele luik van dit onderzoek. De 55 kW inductiemachine die de hydropomp aandrijft in deze opstelling wordt in dit onderzoek bestudeerd. De elektrische motoren aan de andere zijde van de hydrostatische aandrijflijn worden gebruikt als belasting.

In eerste instantie werden verkennende rendementsmetingen van motor en drive uitgevoerd voor een aantal interessant geachte werkingspunten en drive-instellingen. Het doel hiervan was om een zicht te krijgen op welke parameters en fenomenen van belang zijn en welke niet. Uit deze experimenten kon het volgende besloten worden:

- De ingestelde PWM-frequentie (2, 4 of 8 kHz) heeft geen significante invloed op de motorverliezen. Mogelijke verschillen vallen binnen de meetonzekerheid van de opstelling (~100 W).
- De verliezen in de drive stijgen sterk met de PWM-frequentie, zoals verwacht.
- De drive-parameters die een significante impact hebben op het motorrendement zijn deze die een variatie van de motor-flux (en dus -spanning) teweeg brengen. Dit zijn onder meer de parameters die het veldverzwakkingsgedrag definiëren.

In tweede instantie werden ook een aantal volledige rendementskarakteristieken opgemeten voor verschillende sets van drive-instellingen. Er werd een inspanning gedaan om de temperatuur zo constant mogelijk te houden tijdens deze metingen. De resultaten werden gebruikt ter validatie van de ontwikkelde modellen.

Modellering

Motor

Als uitgangspunt werd het welbekende equivalentenschema van een inductiemotor gebruikt. Dit model dekt echter niet alle verliesfenomenen. Bovendien zijn sommige grootheden in dit schema enkel geldig bij nominale snelheid en nominale flux. Volgende verfijningen werden daarom toegevoegd:

- Rotorimpedantie als functie van slip
- IJzerverliezen als functie van toerental en motorflux [1]

- Strooiverliezen als functie van motorstroom en elektrische frequentie
- Verliezen door luchtweerstand als functie van motorsnelheid

Het model maakt gebruik van vereenvoudigde fysische verbanden om de verschillende verliesposten gegeven voor nominale condities, te extrapoleren naar andere, willekeurige werkingpunten.

De uitdaging die dan overblijft is om de gegeven verliezen bij nominale condities onder te verdelen in de verschillende categorieën: koperverliezen, strooiverliezen, ijzerverliezen, rotorverliezen en mechanische verliezen [2]. Meestal wordt net voldoende data teruggevonden om deze opdeling te kunnen maken. Belangrijke input hiervoor zijn onder andere de kenplaatgegevens, het kippkoppel, het rendement bij deellast en de statorweerstand. In geval van ontbreken van bepaalde informatie, kan een veronderstelling gemaakt worden, meestal gebaseerd op data van andere, soortgelijke motoren.

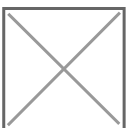
Motor-drive

Voor het modelleren van de verliezen in de drive werd de methodiek gebruikt die beschreven is door Casanellas [3]. De nodige input hiervoor zijn de karakteristieken van de IGBTs en de diodes. Deze vindt men terug via het typenummer het gebruikte IGBT-pack. Indien men niet over deze kennis beschikt, kan men op basis van de stroomspecificatie van de drive een toepasselijk IGBT-pack kiezen.

Validatie

Op basis van de hierboven beschreven methode werd een model opgesteld van de 55 kW inductiemachine en drive gebruikt in de testopstelling. Alleen de op voorhand beschikbare gegevens werden hiervoor gebruikt. De hieronder voorgestelde metingen dienen enkel ter validatie.

In de tweede figuur worden de voorspelde motorverliezen naast de gemeten motorverliezen afgebeeld. Omdat een meting van de interne motortemperatuur ontbreekt, werden foutbalken toegevoegd voor temperatuurafwijkingen van 20 K van de nominale werkingstemperatuur.



De voorspelde versus de gemeten motorverliezen van een 55 kW inductiemachine in verschillende werkingpunten. De foutbalken geven de voorspelde verliezen weer voor een temperatuurafwijking van 20 graden van de nominale temperatuur. Eén van de werkingpunten wordt onhaalbaar met een verhoogde temperatuur, waardoor zijn foutbalk onvolledig is op de figuur.

Besluit

De belangrijkste kenmerken van de voorgestelde modelleringsstrategie zijn:

- Het model is uitsluitend gebaseerd op data beschikbaar via de fabrikant. Er worden geen extra metingen gebruikt.
- Het model omvat alle significante verliesfenomenen. Benaderende fysische verbanden worden gebruikt om de beschikbare nominale data te extrapoleren naar gevraagde

werkingspunten.

- Schakelfrequentie en motorflux of -spanning zijn inputs naar het model. Dit maakt het mogelijk om de effecten van bepaalde drive-instellingen te voorspellen.

Validatie op de elektrische aandrijving met 55 kW inductiemachine toont de bruikbaarheid aan van deze strategie. De algemene trends worden goed voorspeld. De verschillen tussen model en meting vallen veelal binnen de marge van een onzekere werkingstemperatuur.

Meer resultaten en cases met energie-efficiënte aandrijflijnen vindt u op de webpagina's van het (ondertussen beëindigde) project [EcoMechatronics](#).

Bronnen

- [1] Bertotti, Giorgio. "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials." *Magnetics, IEEE Transactions on* 24.1 (1988): 621-630.
- [2] IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators (ANSI), IEEE Std 112-2004 (IEEE 112-1991, 1996).
- [3] Casanellas, F. "Losses in PWM inverters using IGBTs." *Electric Power Applications, IEE Proceedings Vol. 141. No. 5. IET*, 1994.

Auteurs



Pieter Beyl