

EMO InfoTech No. 6

Koppeltoerenkarakteristieken van driefasenmotoren

EMO InfoTech No. 6

Koppeltoerenkarakteristieken van driefasenmotoren

Door Tom Bishop, P.E.

Specialist technische ondersteuning - EASA

Noot vooraf: Dit stuk gaat met name over NEMA motoren. Coderingen zoals genoemd in dit stuk zijn niet van toepassing op de bij ons gebruikelijke IEC motoren. Echter het stuk geeft universeel inzicht in de koppeltoerenkarakteristieken van driefasen motoren.

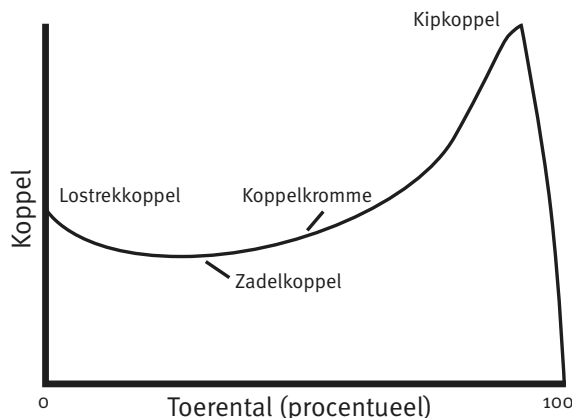
Bij het selecteren van een vervangende elektromotor is de koppeltoerenkarakteristiek van de motoren een belangrijk selectie criterium.

Als voor de nieuwe motor een onjuist ontwerp wordt gekozen, kan het zijn dat de nieuwe motor de belasting niet start of dat de motor een buitensporige aanloopstroom trekt en daardoor overbelastingsbeveiligingen activeert.

Bij reparatie zal de rotor van een kooiankeromotor soms een gebroken rotorstaaf, of een slechte verbinding tussen rotorstaaf en korsluitring blijken te hebben, waardoor deze opnieuw van rotorstaven zal moeten worden voorzien of dat de verbindingen tussen de staven en de kortsluitringen hersteld dienen te worden.

Het materiaal en de fysieke vorm van rotorstaven en kortsluitringen hebben het grootste effect op het aanlopen van de motor en op de prestaties na de aanloop. Simpel gezegd heeft het rotorontwerp een veel grotere invloed op het aanloopkoppel en de stroomkarakteristiek van de motor dan het ontwerp van de statorwikkeling. In dit artikel beschrijven wij enkele essentiële kenmerken die verband houden met de letteraanduiding van de verschillende ontwerpen en de fysieke verschillen tussen de rotors van de verschillende ontwerpen.

De koppeltoerenkarakteristiek (bij aanlopen) van veel driefasenkooiankermotoren die zijn geproduceerd volgens de NEMA-normen (National Electrical Manufacturers Association) vallen binnen vier belangrijke categorieën of ontwerptypen. Deze worden op de typeplaat van de motor aangeduid als ontwerp A, B, C en het minder vaak voorkomende D. Er was ook nog een aanduiding voor een ontwerp E, maar die heeft NEMA enkele jaren geleden ingetrokken. Wat zijn de verschillen tussen de ontwerptypen? We definiëren hier de aanloopkarakteristieken en zullen deze verschillende ontwerpen aan een onderzoek onderwerpen. Opm.: IEC-motoren (International Electrotechnical Commission, hebben geen aanduidingen voor het ontwerptype.



Figuur 1. Koppeltoerenkarakteristiek

Aanloopkarakteristieken

De primaire karakteristieken die in verband worden gebracht met het aanlopen van driefasenmotoren zijn de initiële aanloopstroom, het lostrekkoppel, het zadelkoppel (minimumkoppel) en het kipkoppel (maximumkoppel) (zie figuur 1). De nominale waarden van een motor gelden alle bij nominale spanning en frequentie. De initiële aanloopstroom is de stabiele lijnstroom bij stilstaande rotor. Het lostrekkoppel is

EMO InfoTech No. 6

het minimumkoppel dat een motor in stilstand zal ontwikkelen voor alle hoekstanden van de rotor.

Verder met de definities: het zadelkoppel is het minimumkoppel dat door de motor wordt ontwikkeld gedurende de periode van stilstand tot het toerental waarbij het kippkoppel optreedt. Ten slotte is het kippkoppel het maximumkoppel dat een motor ontwikkelt zonder een abrupte daling van het toerental.

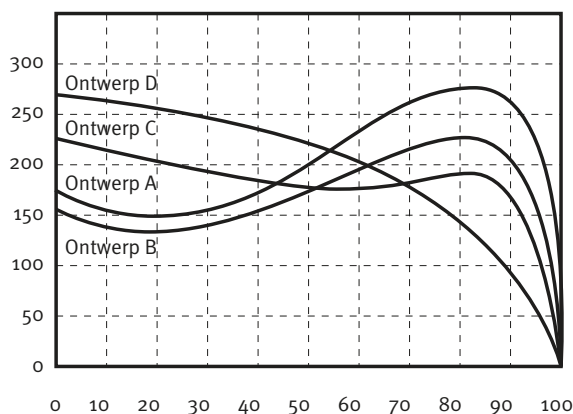
Voordat we beginnen met ons onderzoek naar de verschillende motorontwerpen nog even een waarschuwing: volgens de NEMA-normen gebouwde motoren maken gebruik van alfabetische lettercodes om een aantal kenmerken van wisselstroommotoren aan te duiden. Het gaat hierbij om de kVA-code (lostrekkoppel), het ontwerp en de isolatieklasse. Zorg ervoor dat u zeker weet dat het bij de lettercode die u van de typeplaat haalt om de letter voor het ontwerp gaat en niet om de kVA-code of de isolatieklasse.

Ontwerpen vergelijken

Om de verschillende ontwerpen met elkaar te vergelijken gebruiken we classificaties van aanloopstromen en -koppels. De hoogte van verschillende koppel- en stroomwaarden vs. nominale waarden varieert met het nominale vermogen en het toerental. We zullen dan ook in plaats van te proberen talloze nominale vermogens en toerentallen te kwantificeren, de verhouding van de parameterwaarde vs. nominaal vereenvoudigen door relatieve kwalificaties te gebruiken zoals gemiddeld, hoog en zeer hoog.

Als we de grootte van de initiële aanloopstroom classificeren als gemiddeld of hoog heeft ontwerp A een hoge aanloopstroom, terwijl de ontwerpen B, C en D een gemiddelde aanloopstroom hebben. De NEMA-normen schrijven voor de ontwerpen B, C en D grenswaarden voor de initiële aanloopstroom voor. Maar er is geen standaardgrenswaarde voor de initiële aanloopstroom van een motor van ontwerp A, hoewel deze doorgaans maximaal 20% hoger is dan de grenswaarden voor ontwerpen B, C en D.

Deze karakteristiek zou kunnen leiden tot activering van de aanloopbeveiligingsvoorzieningen van de motor als een motor van ontwerp A een motor van ontwerp B of C vervangt. De mogelijk hogere initiële aanloopstroom bij ontwerp A zou de oorzaak kunnen zijn.



Figuur 2. Koppeldoerencurves voor typische NEMA-ontwerpen

Aanlopkoppel en aanloopstroom

Het lostrekkoppel kan worden geclassificeerd als gemiddeld, hoog of zeer hoog. Het lostrekkoppel is bij ontwerp A en B vergelijkbaar en geldt als gemiddeld. Ontwerp C heeft een hoger lostrekkoppel dan A of B en kan worden geclassificeerd als hoog. Motoren met een ontwerp D hebben een uitzonderlijk hoog aanlopkoppel en kunnen worden geclassificeerd als motoren met een zeer hoog lostrekkoppel (zie figuur 2). Motoren met een ontwerp A of B zijn geschikt voor belastingen als pompen, kleinere ventilatoren, onbelaste transportsystemen, onbelaste compressors en belastingen met een kleine massatraagheid. Ontwerp C kan nodig zijn voor belastingen met een grote massatraagheid zoals grotere ventilatoren en aanjagers, belaste transportsystemen en compressors die deels belast aanlopen. Belastingen met een zeer grote massatraagheid en sterk variërende belastingen zijn vaak het beste af met een ontwerp D. Voorbeelden hiervan zijn stanspersen, takels en liften.

Ofschoon een motor het nominale vermogen kan hebben, dat wil zeggen het vereiste koppel, om een belasting bij nominaal toerental aan te drijven, wil

EMO InfoTech No. 6

dat niet per definitie zeggen dat de motor de belasting ook kan starten. Bijvoorbeeld, een compressor die moet aanlopen met enige kopdruk bij de uitlaat, zal waarschijnlijk het hoge aanloopkoppel nodig hebben dat in verband wordt gebracht met ontwerp C. Het achteloos installeren van een motor van ontwerp B in plaats van een van ontwerp C op een dergelijke compressor kan tot gevolg hebben dat de motor niet tot zijn volledige nominale toerental kan versnellen en ofwel de overbelastingsbeveiliging activeert of beschadigd raakt, dan wel beide.

Het zadelkoppel of minimale koppel is bij motoren van ontwerp A en B vergelijkbaar en geldt als gemiddeld. Het zadelkoppel bij ontwerp C geldt als hoog en ontwerp D heeft geen nominaal zadelkoppel.

Nu we de verschillende ontwerpen hebben beschreven en hebben laten zien hoe deze ontwerpen zijn gerelateerd aan het aanloopkoppel en de aanloopstroom, dringt de volgende vraag zich op: wat is er voor elk van de ontwerpen anders in de constructie van de motor? Het antwoord is te vinden in de rotor, in het bijzonder in de constructie van de rotorstaven. De andere onderdelen van de motor, bijvoorbeeld de stator, zijn gewoonlijk niet direct van invloed op het aanloopkoppel en de stroomkarakteristiek.

Dat komt doordat de koppeltoerenkarakteristiek van motoren van ontwerp D bij stilstaande rotor piekt en geleidelijk afneemt naarmate de rotor versnelt, zoals geïllustreerd in figuur 2. Er is geen minimumwaarde voor het aanloopkoppel omdat de minimumwaarde samenvalt met vollast, dat wil zeggen, er is doorgaans geen dip in de koppeltoerenkarakteristiek.

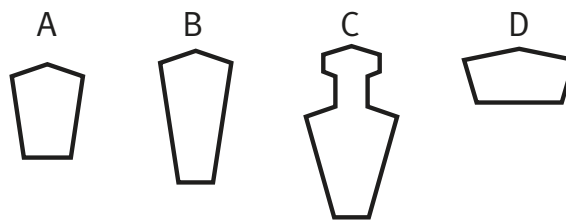
Het kippkoppel of maximumkoppel van een motor van ontwerp B, het meest voorkomende ontwerp, geldt als gemiddeld en het kippkoppel van ontwerp A en C geldt als hoog. Het maximale koppel van motoren van ontwerp D treedt op bij stilstaande rotor en geldt

als zeer hoog vergeleken met de andere ontwerpen. Het kippkoppelniveau van ontwerp A kan nodig zijn in toepassingen als een vormgietmachine, waar het extra koppel wordt gebruikt om ervoor te zorgen dat de gietvorm helemaal vol is voordat de machinedruk wordt vrijgegeven.

Opm.: een interessante bijkomstigheid is dat als u een consumentenartikel koopt zoals een stofzuiger of een tafelslijpmachine, de motor vaak wordt getypeerd met zijn 'maximumvermogen' of 'piekvermogen'. De fabrikant benoemt de motor in die gevallen op basis van het kippkoppel ofwel het maximumkoppel. Als de motor bijvoorbeeld eigenlijk 1 kW heeft, maar een kippkoppel van 200%, zou de fabrikant dit als '2-piek-kW' betitelen.

Constructies vergelijken

Nu we de verschillende ontwerpen hebben beschreven en hebben laten zien hoe deze ontwerpen zijn gerelateerd aan het aanloopkoppel en de aanloopstroom, dringt de volgende vraag zich op: wat is er voor elk van de ontwerpen anders in de constructie van de motor? Het antwoord is te vinden in de rotor, in het bijzonder in de constructie van de rotorstaven. De andere onderdelen van de motor, bijvoorbeeld de stator, zijn gewoonlijk niet direct van invloed op het aanloopkoppel en de stroomkarakteristiek. De term 'gewoonlijk' in de laatste zin is een belangrijke kwalificerende factor. Als de statorwikkeling zodanig wordt veranderd dat hij magnetisch te sterk of te zwak is, zullen de bedrijfskarakteristiek en de aanloopkarakteristiek worden beïnvloed en afwijken van de nominale waarden.



Figuur 3. Voorbeelden van rotorstaafvormen voor motoren van ontwerp A, B, C en D

EMO InfoTech No. 6

In figuur 3 worden algemene rotorconfiguraties voor de vier verschillende ontwerpen gegeven en een toelichting volgt hieronder. In figuur 3 is te zien dat de vorm van de rotorstaven in ontwerp A over het algemeen nogal rechthoekig is en niet zo diep als die van ontwerp B. De rotorstaven in ontwerp B neigen tot een vorm als die van de rotorstaven in ontwerp A, maar zijn dieper en smaller. De dwarsdoorsnede van de staven in ontwerp A is doorgaans groter dan die in ontwerp B, wat resulteert in een lagere weerstand (bij dezelfde materiaalgeleidbaarheid) en dus in hogere initiële aanloopstromen. De diepere staaf in een ontwerp B vergroot het weerstandseffect tot magnetisatie (reactantie) en resulteert in een lager kippkoppel vergeleken met motoren van ontwerp A en vele motoren van ontwerp C.

Rotorkooi

De staafvorm voor ontwerp C is eigenlijk een dubbele staaf of zijn onafhankelijke staven als er twee staven en kortsluitingen zijn. De combinatie van staven en kortsluitingen wordt overigens de rotorkooi genoemd. Als we kijken naar de voorbeeldstaaf in figuur 3 heeft het bovenste deel van de staaf een kleiner geleiderdeel dan het onderste deel.

Bij het aanlopen wordt er in de rotor stroom van lijnfrequentie geïnduceerd en de stroom loopt bijna in zijn geheel door het bovenste deel van de staaf. De reden hiervan is een effect genaamd 'penetratiediepte', dat wil zeggen, hoe hoger de frequentie, des te meer wordt de magnetische flux in de richting van het oppervlak geconcentreerd. De frequentie in de rotor is omgekeerd evenredig aan het toerental. Dus als bij het aanlopen de rotor nog niet draait, is de frequentie de lijnfrequentie, normaal gesproken 50 of 60 Hz; en als de rotor het machinetoerental bereikt, is de frequentie normaal gesproken slechts ca. 2-3 Hz.

Bij het aanlopen loopt de stroom bijna in zijn geheel door de bovenkant van de staven en naarmate de rotorfrequentie met het toenemen van het toerental terugloopt, dringt de stroom dieper in de staven door. Omdat de aanloopstroom zich ophoopt in de

bovenkant van de kooi is het de bovenkant van de kooi die bepalend is voor de aanloopkarakteristiek. Als de rotor eenmaal op snelheid is, neemt het onderste deel van de kooi de overhand, omdat dit het grootste oppervlak heeft en dus de beste geleidbaarheid vertoont. Sommige rotors kunnen twee aparte staven (kooien) boven- en onderstaven hebben of er kan zich ook een fysieke 'brug' tussen boven- en onderkant bevinden, zoals bij een vormgegoten rotorconstructie. De brug tussen boven- en onderstaven heeft zeer weinig effect op de prestaties van de rotor. Als de onderkooi apart is, zal deze staven hebben met een veel grotere soortelijke weerstand dan de bovenkooi.

De andere rotorstaafconfiguratie is die van ontwerp D. De staven bevinden zich doorgaans vlakbij de rotorkern en kunnen breder zijn dan hoog. Vergeleken met het totale staafoppervlak bij de andere ontwerpen is het staafoppervlak bij ontwerp D over het algemeen kleiner. Het kleinere formaat kan worden geplaatst omdat motoren van ontwerp D doorgaans worden gebruikt in toepassingen waarin de belasting kortstondig is, dat wil zeggen, ze worden normaal gesproken niet gebruikt in toepassingen waarin de belasting continu is. Het materiaal heeft een relatief lage geleidbaarheid, dat wil zeggen, een hoge weerstand, wat een lage aanloopstroom en een hoog aanloopkoppel tot gevolg heeft.

Het verschil in de vorm en de geleidbaarheid van de rotorstaven blijkt een enorm effect te hebben op het aanloopkoppel en de aanloopstroom. Dat is de reden waarom het aanbrengen van nieuwe rotorstaven met zorg moet gebeuren. Als we bijvoorbeeld zouden kiezen voor een ander staafmateriaal, koper met een geleidbaarheid van 100% in plaats van persgietaluminium met een geleidbaarheid van 50%, dan zou de rotorweerstand afnemen.

Dit zou dan waarschijnlijk tot gevolg hebben dat de aanloopstroom onaanvaardbaar hoog wordt en het aanloopkoppel onaanvaardbaar laag. Als we in de ronde en taps toelopende gleuven van een vormgegoten

EMO InfoTech No. 6

rotor rechte staven schuiven, zal dit logischerwijs leiden tot luchtruimte tussen de staven en de zijden van de gleuven. De luchtruimte verhoogt de reactantie en vermindert de fysieke steun van de staven. Het eindresultaat zal vrijwel zeker een motor zijn met een onjuist aanloopkoppel en een verkeerde aanloopstroom, maar ook een motor die vroegtijdig defect zal raken als gevolg van het gebrek aan fysieke integriteit van de staven in de gleuven.