

Анализ на влиянието на честотните преобразуватели върху работата на асинхронните двигатели

Миглена Христова

Analysis of the Influence of Variable Frequency Drive on Induction Motors: The problems when induction motors operated with variable frequency drives are classified. Preventive actions to avoid negative impact of the variable frequency drive on induction motors are analyzed.

Key words: variable frequency drives, influence, induction motors

Трифазните асинхронни двигатели (АД) с накъсосъединен ротор и честотните преобразуватели се използват все по-широко в съвременните регулируеми електрически задвижвания за управление на технологичните процеси. Неоспорими са предимствата на честотните задвижвания за намаляване консумацията на електрическа енергия. В задвижванията на механизми с вентилаторна характеристика (центробежни помпи, вентилатори, компресори и др.), икономията на консумирана енергия е от порядъка на (20...50)% [9]. От друга страна такива задвижвания причиняват смущения с различна честота в захранващата мрежа и влияят върху характеристиките и надеждната работа на АД.

В регулируемите задвижвания често се използват стандартни АД, без да се отчитат специфичните условия на работа. Много производители на АД посочват в каталозите си, че определена серия двигатели е предназначена за честотни задвижвания. Все още няма единно становище с какво се различават специалните двигатели за работа с честотни преобразуватели от стандартните и дали е целесъобразно да се произвеждат такива двигатели. За ефективна, безаварийна и продължителна работа на АД при захранване посредством честотен преобразувател е необходимо да се отчитат редица фактори, влияещи на работата на двигателя и на електрозадвижването като цяло.

Целта на това изследване е да се анализират проблемите, възникващи при управление на АД с честотни преобразуватели и да се посочат необходимите мерки за решаването им.

В съвременните регулируеми задвижвания най-широко разпространени са преобразувателите с междинно звено за постоянен ток. При тях променливото напрежение на мрежата първо се изправя и филтрира в звено за постоянен ток, а след това, посредством автономен инвертор се преобразува на принципа на широчинно-импулсно модулиране (ШИМ) в напрежение с регулируема честота и амплитуда. Напрежението на изхода на честотния преобразувател (ЧП) предствявя поредица от високочестотни правоъгълни импулси с еднаква амплитуда и различна широчина. Кривата на напрежението се отклонява значително от синусоидалната форма (фиг.1а), а кривата на тока е близка до синусоидалната, вследствие изглаждащата функция на индуктивността на АД (фиг.1б).

В редица публикации [1, 2, 6, 9] се анализират условията на работа на АД в честотните задвижвания и се посочват следните **най-често срещани проблеми**:

• Висока скорост на нарастване на напрежението на изхода на ЧП

С развитието на силовата полупроводникова техника все по-широко приложение в инверторите намират биполярните транзистори с изолиран гейт (insulated gate bi-polar transistor IGBT). Използването на бързодействащите транзистори IGBT води до бързо нарастване на напрежението, което натоварва извънредно много изолационната система на двигателя. Анализът на произвежданите честотни задвижвания показва, че скоростта на нарастване на напрежението на импулсите при съвременните полупроводникови ключове е

$du/dt > 10kV/\mu s$ [2]. Това е така поради високата скорост на прехода от запушено в отпушено състояние (само $0,1\mu s$). Производителите на АД гарантират безотказната работа на двигателя при значения на $du/dt < 1kV/\mu s$.

• **Висши хармоници на напрежението и тока на изхода на ЧП**

Напрежението на изхода на честотните преобразуватели, формирано на принципа на ШИМ, внася висши хармоници на напрежението и тока в захранващия кабел между преобразувателя и двигателя. Известно е, че хармоничните изкривявания повишават загубите в стоманата (вследствие увеличените загуби от вихрови токове) и електрическите загуби в намотките на двигателя. Изследванията показват, че нарастването на загубите е с около 10-15% [4, 6, 7], което е причина за допълнително нагряване.

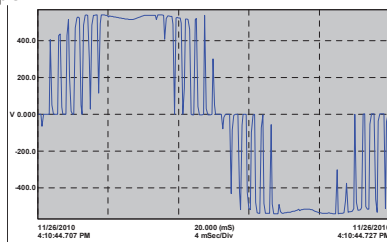
Стандартът IEC 61800-3:2004 [8] определя изискванията и специфичните ограничения, на които трябва да отговарят задвижванията по отношение на хармоничните изкривявания, за да бъдат сертифицирани в Европейския съюз.

• **Високи пикове на напрежението на клемите на асинхронния двигател**

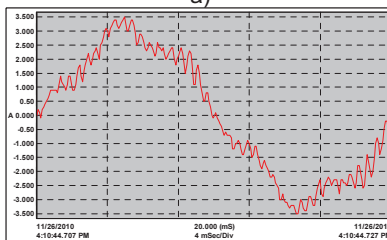
На изхода на инверторите с ШИМ и бързодействащите IGBT транзистори се получава напрежение с висока носеща честота в обхвата (1...20)kHz и бързо нарастване на импулсите за време (0,05...0,6) μs . Това налага да се отчитат явленията свързани с разпространението на високочестотни вълни в проводниците. Високите работни честоти и бързото нарастване на напрежението поставят допълнителни изисквания към дължината на захранващия кабел между честотния преобразувател и двигателя. Установено е, че когато разстоянието между инвертора и двигателя превишава 20m [5] на клемите на АД се получават високи пикове на напрежението. Съгласно теорията на веригите [5], захранващият кабел може да се разглежда като еднородна дълга линия с разпределени параметри. Протичането на високочестотни импулсни сигнали със стръмен фронт в кабела предизвикват вълнови процеси, които водят до появата на пренапрежение на клемите на двигателя. Отражението на вълните в края на кабела при дълга захранваща линия може да доведе до стойности на напрежението на клемите на двигателя два пъти по-високи от напрежението на постояннотоковите шини на изправителя.

По този начин изолацията на намотката на АД е подложена на въздействие на напрежение с импулсна форма, чийто пикове могат значително да превишат амплитудата на първия хармоник. Това води до увреждане и преждевременното стареене на изолацията.

Проведени изпитвания в електролаборатория на водеща фирма [1] с АД с мощност 11 kW, свързан към ЧП 15 kW посредством екраниран кабел с дължина 50m показват, че въртящият момент на двигателя е намалял с 5%, а вибрациите на вала му са нараснали с 2% вследствие на отразената вълна. Също така е увеличено нагряването на намотките му с 4%. Установено е, че първите няколко навивки от фазната намотка са поели 75% от пика на индуктираното напрежение със стойност 1,4kV. Превишаването на du/dt е с толкова голяма стойност, че е надвишена диелектричната якост на изолацията.



а)



б)

Фиг. 1. Типични криви на: а) напрежението; б) тока за една фаза на изхода на честотния преобразувател

● **Влошено охлаждане при ниски честоти на въртене**

Охлаждането на двигателите зависи от скоростта им на въртене, особено при двигателите със закрито обдухваемо изпълнение. Средно, двигателите могат да работят с около 50% [9] от номиналната си скорост без да е необходимо охлаждане от външен вентилатор. При по-ниските скорости двигателите прегряват над допустимата температура, когато липсва независими охлаждане.

● **Протичане на токове през лагерите**

Несиметрията на магнитната система е причина за възникване на напрежение на валовете на АД, което достига стойности от порядъка на $(2...10)V$ [2]. Използването на честотен инвертор води до скъсяване на живота на лагерите на АД вследствие възникването на високочестотни пулсиращи токове, минаващи през тях [3]. Влиянието на тези токове е съществен проблем, причинен от бързодействащите полупроводникови ключове и стръмните фронтове на подаваното напрежение. Веригата се затваря през лагерите и заземлението на АД. Индикация за протичане на електрически ток през лагерите е повишеното ниво на вибрации, причинено от кратерчетата по пътищата на търкаляне и по търкалящите тела, създадени от затварянето на електрическата верига през тях. Тези токове влошават качествата на маслото в лагерите. Реално следствие е възникване на електроерозия в лагерите.

При регулиране честотата на въртене до честоти, превишаващи синхронната, следва да се използват лагери със съответна бързоходност.

● **Повишен шум и вибрации на двигателя**

Високочестотните компоненти на несинусоидалното захранващо напрежение създават условия за силна магнитострикция в шихтования магнитопровод на АД и впоследствие високо ниво на шума. Висшите хармоници в захранващото напрежение на АД предизвикват висши хармоници на магнитния поток, които индукират висши хармоници на е.д.н. и в роторната намотка протичат висши хармоници на тока. Хармониците на тока си взаимодействат с основния магнитен поток и създават допълнителен механичен момент на вала на двигателя. В резултат на това се създават пулсации на въртящия момент и се усилват вибрациите на ротора.

Използването на стандартни двигатели в честотно-регулируемите задвижвания води до преждевременни повреди. Увеличаването срока на служба на АД с общо предназначение в регулируемите задвижвания може да се постигне със схемотехнически решения на честотните преобразуватели или със специални филтриращи устройства в захранващата верига на двигателя.

За подобряване работата на регулируемите асинхронни задвижвания се **предприемат следните мерки:**

● **Монтиране на външни защитни апарати**

Между ЧП и АД се монтират допълнително дросели, du/dt филтри, синусоидални филтри или филтри, монтирани към клемите на двигателя за ограничаване скоростта на нарастване на напрежението (du/dt) и намаляване пиковите на пулсиращото напрежение до регламентираните стойности от стандарт IEC 60034-17 [7].

Използването на синусоидални филтри води до отстраняване явлението отразяване на вълната, ограничава високочестотните съставки и намалява напрежението на клемите на двигателя до допустимите граници, като предпазва двигателя от повреди и аварийно спиране.

● **Използване на екраниран кабел с минимална дължината за захранване на АД**

Известно е, че колкото е по-дълъг кабелът между инвертора и двигателя, толкова е по-голям неговия капацитет и вероятността от получаване на високи

пикове на напрежението се увеличава. Необходимо е дължината на кабела да не превишава 20m [5], където е възможно, за да не възникват пренапрежения на клемите на двигателя.

Производителите предлагат на пазара АД с вградени честотни преобразуватели, които са монтирани към тялото на двигателя. Така малката дължина на кабела, между инвертора и намотките на двигателя, ограничава отразяването на вълната и проблемът с високите пикове на напрежението се премахва.

● **Подходящ избор на изолационната система на АД**

Изолацията на специалните АД, предназначени за честотно регулиране, е с по-високо допустимо импулсно напрежение (от порядъка на 1,8kV [5]) отколкото изолацията на стандартните двигатели. Защитата на двигателя от пренапрежения се постига чрез усилване на междувитковата, каналната и междуфазната изолация. Изборът на изолационната система в тези задвижвания е от съществено значение за безотказната работа на двигателя.

● **Висок клас на топлоустойчивост на изолацията на АД**

АД с общо предназначение са проектирани да работят с определено допустимо прегряване на статорната намотка при продължителен режим на работа. Затова при регулиране скоростта на въртене е необходимо прегряването да бъде в допустимите граници за съответния клас на топлоустойчивост.

Много производители на АД използват изолация с по-висок топлинен клас, обикновено клас F (155°C) или H (180°C) за двигателите, предназначени за работа с инвертори. Това обаче оскъпява двигателите.

● **Форма на каналите на ротора**

При проектирането на двигатели, които се захранват от честотен преобразувател не се цели постигане на висока кратност на пусковия и максималения момент, защото те се получават автоматично в затворената система за регулиране, т.е. не е необходимо роторът да се изработва с дълбоки канали.

Използването на двигатели с дълбоки канали подобрява пусковите характеристики, но води до увеличаване на потока на разсейване, а от там и на индуктивното съпротивление на разсейване. Това от своя страна влошава коефициента на мощността при номинален товар и намалява максималния електромагнитен момент, т.е. двигателите са с по-ниска претоварваща способност.

● **Независимо охлаждане при работа на задвижването с ниски скорости**

Стандартните двигатели са проектирани да работят при определена номинална скорост, а специалните двигатели, предназначени за съвместна работа с ЧП, работят с променлива скорост. Вентилаторните перки се въртят по-бавно при ниската скорост и не осигуряват необходимия дебит на охлаждащ въздух. Проблемът се решава като се използват специални двигатели с независима вентилация, т.е. вентилаторът се задвижва с отделен двигател.

● **Избор на подходящи лагери на АД**

Някои фирми (АВВ, в Русия фирма „Росэнергомаш“) предлагат в АД с честотно-регулиране да се използват лагери с диелектрични покрития, с изолиран вътрешен или външен пръстен (с покритие от алуминиев окис), с керамични търкалящи се елементи или лагерите да се смазват със специална смазка, която образува защитен слой върху триещите се повърхности с диелектрични свойства.

Изборът на подходящи бързоходни лагери и прецизното балансиране на ротора при двигателите, които работят с високи скорости, е от съществено значение за безотказната работа на задвижването.

● **Поставяне на енкодери на вала на двигателя**

Системите за обратна връзка се реализират с енкодери, които осигуряват информация за фазовия ъгъл на ротора и скоростта на въртене. Двигателите за честотно управление се предлагат с монтирани на вала цифрови, инкрементални или абсолютни енкодери за управление по скорост, положение, момент, работещи на индуктивен или оптически принцип.

● **Използване на термисторни защиты**

За защита на двигателите от прегряване към статорната намотка се вграждат термистори. Сигналът от тях се подава на цифровия вход на преобразувателя. По този начин се контролира температурата на нагряване да не превишава допустимата температура за съответния клас на топлустойчивост на изолацията.

Конструкторите и производителите на АД допускат работа на стандартните двигатели в честотни задвижвания с мощност по-ниска от номиналната. Честотата на напрежението на изхода на съвременните преобразувателя може да се регулира до 400Hz, а за някои преобразуватели до 1000Hz. Работата на АД с общо предназначение при честоти над 75% е опасна за механичната част на двигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Систематизирани са проблемите, възникващи при захранване на асинхронните двигатели посредством честотни преобразуватели.

2. Анализирани са превантивните мероприятия за преодоляване негативното въздействие на честотните преобразуватели върху работата на асинхронните двигатели.

3. За повишаване надеждността на честотните задвижвания се препоръчва поставяне на подходящи филтри между преобразувателя и двигателя и използване на асинхронни двигатели с усилена изолационна система, с изолирани лагери и независимо охлаждане.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Синусоидални филтри за честотни инвертори, Сп. Инженеринг ревю, бр. 6, април 2008.

[2] Честотни инвертори. Технически тенденции в конструктивното им развитие, критерии за избор, методи за регулиране, Сп. Инженеринг ревю, бр. 3, април 2008.

[3] ABB Technical Guide No.5 - Bearing currents in modern AC drive systems, ABB Automation Group Ltd, 1999.

[4] Almeida A. T., H. Falkner and J. Fong, EuP Lot 30: Electric Motors and Drives Task 3: Consumer Behaviour and Local Infrastructure, ISR-University of Coimbra, 2012.

[5] GAMBICA/REMA, Technical Report NO. 1, Variable Speed Drives and Motors. Motor Insulation Voltage Stresses under PWM Inverter Operation, 2001.

[6] <http://www.motor-challenge.eu>

[7] IEC 60034-17 Въртящи се електрически машини. Индукционни двигатели с кафезен ротор, захранвани от преобразуватели. Ръководство за прилагане.

[8] IEC 61800-3:2004 Електрозадвижващи системи с регулиране на скоростта. Изисквания за електромагнитна съвместимост и специфични методи за изпитване.

[9] Penrose H. W., Repair specification for low voltage polyphase induction motors intended for pwm inverter applications, Old Saybrook, CT, 2001.

За контакти:

Гл. ас. инж. Миглена Христова, Катедра "Електроснабдяване и електрообзавеждане", Русенски университет "Ангел Кънчев", Тел.: 888 659, E-mail: mcankova@ru.acad.bg

Докладът е рецензиран.