

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СПОСОБІВ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Толочко О.І., д.т.н., проф., Бурмельов О.О., студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Вступ. Синхронний двигун з постійними магнітами (СДПМ), завдяки своїм високим експлуатаційним характеристикам, є найбільш перспективною електричною машиною в діапазоні малих та середніх потужностей. СДПМ володіє малими масогабаритними показниками при порівняно високих значеннях крутного моменту, не має втрат на збудження, може мати різноманітні конструкційні виконання та ін. Ці якості виділяють його з ряду всіх інших машин й забезпечують йому застосування в системах автоматичного управління, приводах подачі верстатів, прецизійних системах стеження, а також у системах, де стабільність швидкості є першочерговою вимогою, що пред'являються до технологічного процесу. До того ж постійне здешевлення магнітних матеріалів, зокрема, впровадження сплавів рідкоземельних металів, удосконалення апаратної бази керування роблять можливим використання цього типу двигунів в тих областях, де традиційно використовувались асинхронні двигуни чи двигуни постійного струму. Саме тому виникає потреба у створенні енергоефективних і високоточних систем керування такими двигунами.

Мета роботи – виконати аналітичний огляд існуючих способів керування синхронним двигуном з постійними магнітами, виявити їх переваги та недоліки та окреслити подальші тенденції їх розвитку.

Матеріали дослідження. Спрямованість розвитку принципів керування СДПМ в основному обумовлюється розвитком апаратної бази приводу: параметрами самого двигуна, типом перетворювача, наявністю датчиків кута повороту і (або) швидкості, обчислювальною потужністю контролера.

Методи побудови самих систем керування для СДПМ відрізняються різноманітністю. Розглянемо кожен із способів керування докладніше.

Принцип *векторного управління СДПМ* заснований на орієнтації вектора потокозчеплення, створюваного постійними магнітами, тому в деяких джерелах його називають «полеорієнтованим» (*FOC – Field-Oriented Control*). Мета даного методу полягає в тому, щоб керувати СДПМ, як окремо збудженою машиною постійного струму, де потокозчеплення і момент можуть керуватися окремо. Миттєві значення струмів статора перетворюються в обертову систему координат dq , пов'язану з ротором, за допомогою математичних рівнянь і інформації про стан ротора. При підтримці струму i_d рівним нулю (в класичному випадку), потокозчеплення по осі d буде постійним. В цьому випадку електромагнітний момент буде пропорційний струму i_q , який задається за допомогою системи керування. Також, щоб домогтися роздільного керування потокозчепленням і моментом необхідно виконати компенсацію перехресних зв'язків в dq моделі СДПМ.

Керування СДПМ на базі векторного керування як правило здійснюється з використанням оптимальних алгоритмів (стратегій). Оптимальне керування – це керування, що забезпечує досягнення найкращих, за обраним критерієм, показників системи керування в умовах заданих обмежень на керуючі дії та змінні стану.

До найбільш розповсюджених стратегій керування належать «Максимальний момент на ампер» (ММА), «Максимальний момент на вольт» (ММВ) і «Мінімізація сумарних втрат» (МСВ).

Стратегія ММА полягає у забезпеченні максимально можливого моменту при заданому струмі статора, або у забезпеченні мінімально можливого струму статора при заданому моменті. Це сприяє мінімізації теплових втрат електроенергії в обмотках статора (втрати у міді). Позитивний ефект досягається за рахунок оптимального розподілу струму статора i_s на поздовжню (i_d) та поперечну (i_q) ортогональні складові. Цю стратегію зазвичай використовують при регулюванні швидкості у першій зоні, в якій регулювання здійснюється переважно за рахунок зміни напруги статора, а втрати у міді значно перевищують втрати у сталі [1].

У другій зоні регулювання швидкості здійснюється за рахунок послаблення поля при постійній напрузі статора із застосуванням різних модифікацій алгоритму *Field Weakening Control (FWC)*. Послаблення поля досягається шляхом підвищення d -складової струму статора у від'ємному напрямку до перетину з лінією ММВ, на якій досягається мінімально можливе значення потокозчеплення. Регулювання у другій зоні після досягнення рівня струмообмеження здійснюється при сталій потужності, тобто при зміні моменту двигуна, зворотно пропорційно до швидкості.

Подальше збільшення швидкості можливе тільки за рахунок зменшення q -складової струму статора при постійній напрузі і постійному потокозчепленні, що приводить до зменшення амплітуди просторового вектору струму і електромагнітного моменту (третя зона). Регулювання у третій зоні відбувається за стратегією ММВ, відповідно до якої при обмеженій напрузі статора досягається максимально можливий електромагнітний момент двигуна та мінімально можливе потокозчеплення. Оскільки від величини потокозчеплення залежать втрати у сталі, які зростають при підвищенні швидкості і у третій зоні зазвичай перевищують втрати у міді, то іноді регулювання за стратегією ММВ ототожнюють з мінімізацією втрат у сталі [2].

Найбільшої енергоефективності системи електропривода можливо досягти при використанні стратегії керування МСВ, яка дозволяє одночасно мінімізувати сумарні втрати електроенергії в міді та в сталі. Але, якщо для стратегій ММА і ММВ знайдено аналітичні рішення, то стратегію МСВ здійснюють або за допомогою інтерполювання тривимірних таблиць, або за допомогою ітераційних чисельних методів пошуку оптимального керування у реальному часі, яке потребує ускладнення математичної моделі двигуна шляхом врахування втрат у сталі.

Застосування таблиць оптимізації в системах керування потребує виконання попередніх розрахунків для кожного двигуна та не дозволяє адаптувати отримані масиви даних при зміні параметрів, що їх визначають [1].

У 1986 році було запропоновано принцип керування, який не вимагає наявності підлеглих струмових контурів і ШІМ - *метод прямого керування моментом (DTC – Direct Torque Control)*, в якому діюча протягом де-якого (зазвичай невеликого) інтервалу часу напруга визначається обраним на цей час станом інвертора й залежить тільки від знаків похибок регульованих координат, тобто фактично реалізується релейне керування. Для обмеження частоти переключень інвертора вводиться гістерезис. Цей метод керування має ряд переваг: простота реалізації, висока швидкодія, мала чутливість до зміни параметрів двигуна [6]. Головним недоліком цього методу є наявність великих пульсацій електромагнітного моменту через розривність керуючого сигналу.

Іншим способом керування СДПМ є застосування *систем з ковзними режимами (Sliding Mode Systems)*, де використовуються регулятори з нескінченним коефіцієнтом підсилення. Принцип керування полягає в тому, що знак керуючого сигналу змінюється на протилежний при перетині поверхні ковзання, яка описується рівнянням, складеним на основі змінних стану об'єкта. В порівнянні з прямим керуванням моменту цей метод дозволяє уникнути помилки регулювання електромагнітного моменту при високій частоті обертання ротора. Недоліками є: можливість втрати системою стійкості в області досягнення поверхні перемикання; високочастотні перемикання, що тягне за собою швидкий знос механічних і електричних частин електроприводу; високі вимоги до перетворювача.

Також методи керування СДПМ можна поділити на керування з використанням датчику положення ротора і на керування без його використання, яке отримало назву «бездатчикового керування».

У класичному електроприводі на основі СДПМ на валу двигуна встановлюється ДПР, у якості якого може використовуватись: енкодер, резольвер, редуктосін і ін. Значні успіхи в області сучасної теорії автоматичного керування призвели до появи бездатчикових електроприводів. У таких системах ДПР відсутній, а необхідна інформація для реалізації алгоритму керування розраховується математичним шляхом. Особливу роль бездатчикові системи грають в тих електроприводних системах, де установка ДПР фізично неможлива. Перевагами бездатчикових систем є надійність, дешевизна, компактність. Велика частина методів бездатчикового керування, описаних як у вітчизняній, так і в зарубіжній літературі, заснована на математичних моделях електромагнітних процесів, що протікають в машині змінного струму. В таких методах обчислення швидкості обертання поєднується з обчисленням модуля і кутового положення вектора ЕРС ротора. Дані методи відрізняються один від одного точністю обчислення швидкості обертання і чутливістю до зміни параметрів, що містить математична модель. Недоліком таких методів є зниження діапазону регулювання швидкості двигуна, так як величина ЕРС ротора в цьому випадку прагне до нуля і не може забезпечити необхідної величини сигналу.

Висновки. В статті представлені основні засоби керування синхронним двигуном з постійними магнітами. Проаналізовано їх переваги та недоліки. Зокрема, система полеорієнтованого керування вимагає точного визначення кутового положення ротора, має значну чутливість до зміни параметрів двигуна і вимагає складної системи ШІМ. Проте, в статичних режимах забезпечує менші втрати обчислювальних ресурсів і менший рівень пульсацій моменту порівняно з системою з прямим керуванням моменту. В свою чергу, система з прямим керуванням моментом краще відпрацьовує керуючі впливи, має високу швидкодію та малу чутливість до зміни параметрів двигуна, однак створює електромагнітний момент в СДПМ з пульсаціями у сталому режимі через розривність керуючого сигналу. Основною тенденцією в розвитку векторного керування СДПМ є розробка оптимальних алгоритмів, що забезпечують досягнення найкращих, за обраним критерієм, показників системи керування. Однак такі алгоритми вимагають знання точних параметрів двигуна та є дуже чутливими до їх зміни. Відтак, питання аналізу та синтезу систем оптимального керування СДПМ ще потребують удосконалення. Всі розглянуті системи можуть реалізовуватися як з датчиком положення ротора, так і без нього. Для приводів з малим діапазоном регулювання рекомендується використання бездатчикового керування, що дозволить спростити та здешевити систему. Для приводів з високими вимогами, де вимагається багатозонне регулювання та забезпечення стабільної роботи двигуна на низьких швидкостях є необхідним встановлення датчика положення ротора.

Перелік посилань

1. Толочко О.І. Визначення допустимої області застосування оптимальних алгоритмів керування синхронними двигунами з постійними магнітами / О.І. Толочко, Є.О. Вареник, В.В. Божко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. - Київ: «Техніка». - №03(79). – С. 72-74.
2. Толочко О.І. Дослідження електроприводів на основі синхронного двигуна з постійними магнітами при оптимальному керуванні за максимумом моменту на ам-пер / О.І. Толочко, В.В. Божко // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. научн. тр. УкрНИИВЭ. – 2010. – Донецьк: ООО «АИР». – С. 242- 247.
3. D. S. Maric, S. hiti, C. C. Stancu, “Robust Flux Weakening Scheme for Surface-Mounted Permanent-Magnet Synchronous Drives Employing an Adaptive Lattice-Structure Filter,” 1999.
4. Morimoto, M. Sanada, Y. Takeda, “Wide Speed Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with High Performance Current Regulator,” IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.IA-30, No.4, pp. 920-926, Aug. 1994.
5. Толочко О.І. Анализ систем управления синхронными двигателями с постоянными магнитами при регулировании скорости вверх от номинальной / О.И. Толочко, В.В. Божко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2010. – Харків: НТУ «ХПІ». – №28. – С. 149-152.
6. Толочко О.І. Ідентифікація індуктивностей синхронного двигуна з постійними магнітами рекурентним методом найменших квадратів / О.І. Толочко, В.В. Божко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: „Електротехніка і енергетика”. – 2012. – ДВНЗ „ДонНТУ”. – Вип. №1 (12)-2(13). – С. 234-238.