

ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

Бурик М. П.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Запропоновано систему векторного керування електромеханічними координатами вентильно-індукторного електроприводу з алгоритмами регулювання на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергії під час дії параметричних та координатних збурень.

Постановка проблеми. Поява якісних перетворювачів частоти кардинально змінила традиційний електропривод з асинхронним двигуном (АД) та надала можливість для застосування силового вентильно-індукторного приводу ВІП (Switched Reluctance Drive). Винахідником ВІП вважають П. Лоуренсона з Великобританії. Принцип роботи ВІП є простим та полягає у притягуванні металевого тіла зуба ротора до збудженого полюса статора. У цих електроприводах використовують двигун з самозбудженням (ВІД з СЗ) (магнітне поле створюється котушками полюсів статора) або двигун з незалежним збудженням (ВІД з НЗ), який має додаткову обмотку збудження. Друга машина (ВІД з НЗ) є більш складною за побудовою та має можливість керування магнітним полем.

Переваги ВІД з СЗ над іншими приводами: проста, дешева та надійна конструкція електричної машини (відсутність обмоток на роторі); немає постійних магнітів; відсутня технологічна операція заливки ротора; зручний монтаж, демонтаж та ремонт; має кращі габаритні та енергетичні показники; великі моменти на низьких кутових швидкостях ротора та невеликі струми; проста фіксація ротора у заданій позиції; відсутність колектору. До недоліків ВІД з СЗ належать: неможливість працювати без перетворювача частоти; наявність давача положення; складність керування процесами в електропроводі для забезпечення високих якісних показників; підвищені шуми та вібрації; пульсації моменту [1]. Незалежно від типу двигунів під час варіації моменту навантаження характер зміни відносних значень постійних та змінних складових втрат є майже однаковим. А у зоні малих моментів навантаження $0,5M_n \geq M$ двигуни постійного струму з послідовним збудженням ДПС з НЗ (Motor with Series Excitation), АД (Induction Motor) та ВІД з НЗ (Field Regulated Reluctance Motor) мають менші втрати під час регулювання магнітного потоку у порівнянні з синхронними машинами з регульованим збудженням СД (Synchronous Motor with Adjustable Excitation) [2].

Проте надійний та найпоширеніший асинхронний двигун має недолік, який пов'язаний з проблемою відводу тепла у наслідок нагрівання обмотки ротора, а двигуни постійного струму з послідовним збудженням ДПС мають колектор та ковзний контакт.

Тому альтернативою асинхронному електроприводу є привод з ВІД з НЗ (має менші пульсації порівняно з ВІД з СЗ), для якого використовуються стандартне векторне керування. ВІД з НЗ має два пакети обмотки статора, між якими розташована незалежна обмотка збудження постійного струму. На розподілену трифазну обмотку, вітки якої охоплюють разом обидва пакети, подається зміна напруга живлення.

Електрична машина створює активний електромагнітний момент. Для зменшення впливу вихрових струмів статор й ротор з явно вираженою зубцевою структурою зроблені з шихтованого електротехнічного заліза [3]. Математична модель ідеального інвертору та електричної машини має стандартні допущення: не враховується чутливість до завад у вхідних сигналах, ефекти немодельованої динаміки та параметричної невизначеності системи автоматичного керування, не ідеальність інвертора, ефекти квантування сигналів за часом й рівнем, несиметрія магнітних та електричних параметрів трифазних обмоток та неідеальність магнітних матеріалів. Прийнято, що відсутні втрати в сталі статора та ротора (гістерезис та вихрові струми), ЕРС обертання мають синусоїдальну форму, відсутнє насичення магнітного кола, симетричні зсуви осей обмоток статора і ротора на 120° , відсутнє в'язке тертя.

Розглянута конструкційна особливість ВІД НЗ дозволяє застосувати для регулювання координат електропривода систему прямого векторного керування з орієнтацією до положення ротора. Для спрощення процесів електромеханічного перетворення енергії представляється трифазний ВІД з НЗ у вигляді математичної еквівалентної двохфазної моделі у синхронній системі координат ($d-q$) у вигляді нелінійної системи диференціальних рівнянь (1) [4].

Координати електромеханічної системи $i_d, i_q, \omega, \psi_d, \psi_q$ є взаємозв'язаними між собою внаслідок їх добутку $\omega_0 \psi_q, \omega_0 \psi_d, \psi_q i_d$ та $\psi_d i_q$ [5].

$$\begin{cases} L_s \dot{i}_d + R_s i_d = u_d + (-L_m \dot{i}_f + \omega_0 \psi_q); \\ L_s \dot{i}_q + R_s i_q = u_q + (-R_s i_q - \omega_0 \psi_d); \\ L_f \dot{i}_f + R_f i_f = u_f + (-R_f i_f - L_m \dot{i}_d); \\ J \dot{\omega} = [T - T_l]; \\ \psi_d = L_s i_d + L_m i_f; \\ \psi_q = L_s i_q; \\ \psi_f = L_f i_f + L_m i_d; \\ T = \sqrt{3} Z_p (\psi_d i_q - \psi_q i_d); \\ \dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = Z_p \omega, \end{cases} \quad (1)$$

де ε_0 – кутове положення системи координат ($d-q$);

ω_0 – кутова частота обертання магнітного поля статора;

Z_p – число пар полюсів;

ω – кутова швидкість ротору;

J – момент інерції електромеханічної системи;

T, T_l – електромагнітний момент двигуна та момент навантаження;

Ψ_d, Ψ_q, Ψ_f – компоненти потокозчеплення статора осі $(d-q)$ та потокозчеплення обмотки збудження;

i_d, i_q – компоненти струму статора осі $(d-q)$;

L_s, L_f, L_m – індуктивності обмоток фази статора, збудження та взаємна індуктивність між ними;

u_d, u_q – компоненти напруги статора осі $(d-q)$;

R_s, R_f – активний електричний опір обмоток статора та збудження;

i_f, u_f – струм та напруга обмотки збудження.

Властивості двигуна наближаються до СД з збудженням зі сторони ротора та ковзним контактом. Проте двигун має просту конструкцію, кероване збудження та дозволяє перегрівання ротору. У ВІД з НЗ відсутні ковзний контакт та перемагнічування ротора. Також запропонований двигун має високі енергетичні показники. Проте наявність паразитного шляху замикання магнітного потоку збудження через підшипникові щити є недоліком даної машини [3].

Вибраний двигун є взаємозв'язаним та нелінійним об'єктом керування, параметри якого змінюються під час його експлуатації. Таким чином, на якість керування координатними запропонованої електромеханічної системи впливають збурення, що обумовлює невизначеність математичної моделі об'єкта регулювання. А застосовані традиційні алгоритми керування за своєю природою є компенсаційного виду. Наприклад, передаточні функції регуляторів, що налаштовані на найбільш поширений технічний або симетричний оптимум компенсують відповідні складові ланки об'єкта керування для отримання необхідної передаточної функції контуру керування.

Як наслідок для забезпечення заданої якості керування потрібно знати точні значення параметрів об'єкта, а при їхній зміні внаслідок нагрівання електродвигуна або під час варіації сумарного моменту інерції електроприводу – застосовувати додаткові алгоритми ідентифікації або адаптації, що підвищує складність системи керування.

Інша проблема виникає при керуванні двигунами змінного струму в результаті взаємного впливу координат. У цьому випадку традиційні алгоритми керування отримуються за рахунок статичної декомпозиції на відносно незалежні підсистеми з використанням додаткових компенсуючих зв'язків.

Вирішити цю задачу без застосування додаткових алгоритмів ідентифікації та компенсації можна за допомогою концепції зворотної задачі динаміки в поєднанні з мінімізацією миттєвих функціоналів енергії руху (КЗЗД з МЛФ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Орієнтація на енергозберігаючі технології у промисловості, транспорті, житлово-комунальному та сільському господарстві вимагають використання надійних та дешевих частотно-керованих електроприводів змінного струму. Тому електроприводи на базі ВІД почали використовувати у наземному та підводному транспорті (УРГПУ "НПП", ООО "НПП" "Эмертон", ЗАО "ИРИС", Росія), у гірничодобувній техніці (Joy Global, США), у насосному та компресорному обладнанні

(американська компанія Weir Speciality Pumps), на електромеханічних трансмісіях кар'єрних навантажувачах (виробник сільськогосподарської техніки компанія Deegre&Company, США), у сільськогосподарських оприскувачах (Agriculture Company AGCO, США), для гібридних автомобілів та електромобілів (Nedic Corp., Land Rover, Європа) [6].

Вибір запропонованого двигуна пов'язаний з властивістю роботи в агресивних середовищах, з малими пульсаціями моменту під час використання векторного керування та розподіленої обмотки якоря, великою зоною постійності потужності за рахунок наявності обмотки незалежного збудження [3].

Мета статті. Дослідження застосування вентильно-індукторних приводів для насосів, вентиляторів, компресорів та інших механізмів. Ознайомлення з особливостями математичної моделі ВІД з НЗ та робастним алгоритмом регулювання векторною системою під час дії дестабілізуючих факторів на основі КЗЗД з МЛФ.

Основні матеріали дослідження. В основу концепції покладена ідея зворотності В основу концепції покладена ідея зворотності прямого метода Ляпунова по дослідженню стійкості, що дозволяє знаходити алгоритм керування, при якому замкнутий контур має наперед задану функцію Ляпунова.

В якості функції Ляпунова виступає миттєве значення енергії. Отриманий алгоритм надає замкнутій системі властивість стійкості в цілому, що дозволяє вирішувати задачі керування взаємозв'язаними, нелінійними об'єктами, як для лінійних систем по математичних моделях локальних контурів.

За порядком диференціального рівняння об'єкта керування визначається порядок диференціального рівняння замкнутого контуру з бажаною якістю керування. Ступінь наближення реального процесу керування до бажаного оцінюється локальним функціоналом. Старші похідні рівнянь об'єкта та бажаної якості керування входять до виразу локального функціонала, який є функцією Ляпунова. Мінімізація функціонала проводиться за градієнтним законом першого порядку. Характерною особливістю оптимізації є досягнення не абсолютного мінімуму функціонала якості, як в традиційних системах, а деякого мінімального значення, що забезпечує допустиму за технічними вимогами динамічну похибку системи [4].

Умова збіжності процесу мінімізації функціоналу представлена рівняннями (2):

$$G(u) \rightarrow 0;$$

$$\frac{dG(u)}{dt} = -k \frac{\partial f(u, x^{(i)})}{\partial u} [z^{(n)} - x^{(h)}]^2 < 0; \quad (2)$$

$$\text{sign}(k) = \text{sign}\left(\frac{\partial f(u, x^{(i)})}{\partial u}\right); t \rightarrow \infty,$$

де u – керуюча функція;

k – коефіцієнт підсилення регулятора;

z – проміжна координата;

x – регульована координата;

h – порядок лівої частини рівняння локального контуру об'єкта керування;

n – порядок лівої частини рівняння, за допомогою якого задається бажана якість регулювання координати замкнутого контуру.

В результаті отримується алгоритм керування, одна з складових якого знаходиться з рівняння бажаної якості (3):

$$u = k \left[z^{(n-1)} - x^{(h-1)} \right]; \quad (3)$$

$$z^{(n-1)} = \sum_{j=0}^{(m-1)} \beta_j x^{*(j)} - \sum_{i=0}^{(n-2)} \gamma_i x^{(i)},$$

де γ_i, β_j – коефіцієнти, які визначають характер та тривалість аперіодичного перехідного процесу;

x^* – завдання координати;

m – порядок правої частини рівняння ($n \geq m$), за допомогою якого задається бажана якість регулювання координати замкнутого контуру.

Висновки. Розглянутий вентильно-індукторний привод є перспективним приводом для застосування в різних сферах народного господарства, та має наступні переваги:

- енергетичні показники ВІП у зоні малих моментів навантаження $0,5 \text{ Мн} \geq M$ є кращими ніж у асинхронного та синхронного електроприводів;
- наявність у ВІД з НЗ керованого контур збудження, що розширює зони регулювання кутової швидкості ротора угору в $3 \div 5$ разів;
- відсутність роторних обмоток, що дозволяє перегрівання ротору;
- можливість використання стандартних перетворювачів частоти, які розроблялись для асинхронного електропривода;
- перехід від живлення 10 кВ до 0.4 кВ для електроприводів великої потужності;
- має велику зону сталості потужності та малі пульсації моменту під час застосування векторного керування.

Недоліком ВІД з НЗ є наявність паразитного шляху замикання магнітного потоку збудження через підшипникові щити та складність монтажу обмотки збудження. А запропонована система векторного керування ВІД з НЗ на основі КЗЗД з МЛФ забезпечує грубість до дії різних дестабілізуючих факторів без застосування додаткових алгоритмів ідентифікації та компенсації.

Переваги запропонованого методу керування електромеханічними координатами електроприводу є наступними:

- проста реалізація представлених алгоритмів керування за рахунок відсутності диференціальних ланок;
- можливість розробки регуляторів в умовах невизначеності математичної моделі об'єкта керування;
- алгоритми керування забезпечують слабку чутливість до зміни параметрів електропривода та динамічну декомпозицію взаємозв'язаної системи;
- процеси у реальному контурі прямують до бажаних за рахунок підвищення коефіцієнта підсилення при цьому забезпечується динамічна декомпозиція системи;

- стійкість контуру керування зберігається при підвищенні коефіцієнта підсилення регулятора.

Список використаних джерел

1. Вентильно-индукторный электропривод / Ильинский Н. Ф., Кузнецов В. А., и др. Доклады научно-практического семинара. Москва : 97-7.
2. Усинин Ю. С. Потери в регулируемых электроприводах при разных законах управления / Усинин Ю. С., Григорьев М. А., Шишков А. Н., Виноградов К. М., Горожанкин А. Н., Бычков А. Е. *Энергетика. Вестник ЮУрГУ*. №14. В.13. 2010. С. 47 -51.
3. Козаченко В. Ф. и Лашкевич М. М. Вентильно-индукторный электропривод с независимым возбуждением для тягового применения. *Электронные компоненты*. № 6. 2005. С. 60-64.
4. Ostroverkhov M. and Pyzhov V. Control of the Electric Drive with Field Regulated Reluctance Machine. *Energy smart systems IEEE Ess*. Vol. 6. Kyiv, 2019. P. 277-282.
5. Островерхов М. Я., Бурик М. П. Система векторного керування швидкістю вентильно-індукторного двигуна. *Тези доповідей за матеріалами XXV Міжнародної конференції з автоматичного керування "АВТОМАТИКА/AUTOMATICS 2018"*. Львів : Національний університет "Львівська політехніка", 2018. Вип. 42. С. 245-249.
6. Птах Г. К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт. *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. №3. Т.2. 2015. С. 23-31.

Аннотация

ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Бурик Н.П.

Предложено систему векторного электромеханическими координатами вентильно-индукторного электропривода с алгоритмами регулирования на основании концепции обратных задач динамики в соединении с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергии, во время действия параметрических и координатных возмущений.

Abstract

AC DRIVE WITH OF FIELD REGULATED RELUCTANCE MOTOR

M. Buryk

Vector control system of electromechanical coordinates of the electric drive with of field regulated reluctance motor is proposed on the basis the concept of inverse problems of dynamics combined with the minimization of the local instantaneous energy values during the action of parametric and coordinate perturbation.