

Vektorové řízení asynchronního motoru s neuronovým estimátorem rychlosti

Martin Kuchař¹

¹Katedra výkonové elektroniky a elektrických pohonů, FEI,
VŠB – Technická Univerzita Ostrava, 17. listopadu 15,
708 33, Ostrava-Poruba
martin.kuchar@vsb.cz

Abstrakt. Příspěvek se zabývá problematikou tzv. bezsensorových pohonů, které pro svou funkci požadují pouze měření statorových proudů, případně napětí. Nevýhody mechanických snímačů rychlosti vedou k vývoji různých estimačních technik pro určení rychlosti motoru. V principu lze tyto metody rozdělit na „klasické“ založené na znalosti matematického modelu stroje nebo techniky využívající umělé inteligence. V příspěvku je prezentován rychlostní estimátor založený na přímé umělé neuronové síti, který pro svou aplikaci nevyžaduje znalost žádných parametrů použitého stroje. Prezentovaný estimátor byl začleněn do struktury vektorově řízeného asynchronního motoru, která byla nejprve simulována v prostředí Matlab a následně došlo k implementaci na reálném laboratorním systému s digitálním signálovým procesorem TMS 320C40. V závěru příspěvku jsou pak prezentovány experimentální výsledky.

Klíčová slova: vektorové řízení, umělá neuronová síť, asynchronní motor, DSP

1 Úvod

K vyhodnocení polohy a rychlosti (bez použití snímačů) se v současné době používají různé druhy estimátorů realizované naprogramovaným softwarem v řídicím mikropočítači. Jejich nasazení umožňuje především neustále klesající cena signálových procesorů (DSP) a jejich rostoucí výkon.

Hlavní důvody k nasazení bezsensorového pohonu jsou:

- redukce ceny a použitého hardwaru
- nárůst mechanické robustnosti
- nasazení v agresivním prostředí
- vyšší spolehlivost
- snížení požadavku na údržbu
- nárůst šumové imunity
- neovlivněný moment setrvačnosti stroje

Existuje mnoho estimačních technik, ale obecně je lze rozdělit na tzv. tradiční, využívající modelovou reprezentaci stroje, nebo estimátory založené na umělé inteligenci.

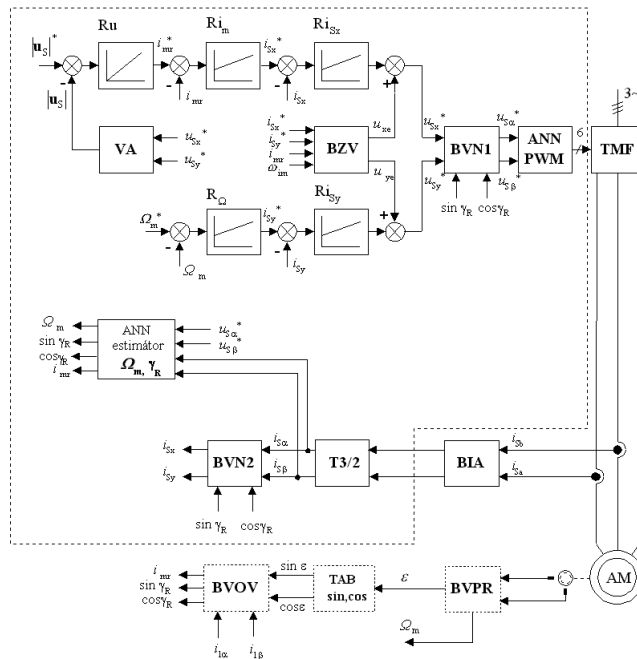
2 Estimátor rychlosti s přímou umělou neuronovou sítí

Pro realizaci estimátoru bylo nejprve potřeba určit vhodnou strukturu neuronové sítě s patřičnými vstupními veličinami. Jelikož doposud neexistuje obecně uznávaný algoritmus pro určení struktury sítě pro danou aplikaci, byla síť získána pomocí testování různých topologií a zjišťování přesnosti estimace. Snahou bylo dosáhnout co jak nejjednodušší neuronovou sítí s dostatečnou přesností odhadu, což je klíčem k aplikacím umělých neuronových sítí v průmyslu. Dalším cílem byl rovněž přímý odhad rychlosti neuronovou sítí bez pomocných odhadů magnetických toků apod.

Byla navržena přímá vícevrstvá umělá neuronová síť – vstupní, skrytá a výstupní vrstva. Vstupními veličinami jsou $u_{S\alpha}^*(k)$, $u_{S\alpha}^*(k-1)$, $u_{S\beta}^*(k)$, $u_{S\beta}^*(k-1)$, $i_{S\alpha}(k)$, $i_{S\alpha}(k-1)$, $i_{S\beta}(k)$, $i_{S\beta}(k-1)$. Na místo skutečných složek vektoru napětí \mathbf{u}_S jsou použity složky požadovaného vektoru napětí, které jsou přímo známy v implementované struktuře vektorového řízení (žádaný vektor statorového napětí je vstupem do vektorového pulsně-šířkového modulátoru), a není tedy potřeba napětí měřit. Jako aktivační funkce ve skryté vrstvě byla použita sigmoidní funkce, ve výstupní vrstvě pak funkce lineární. Prezentovaná síť má strukturu 8-22-1 a její trénování bylo realizováno pomocí Levenberg-Marquardtova algoritmu prostřednictvím programu Matlab. Vhodný výběr trénovacích dat je naprosto klíčovým faktorem pro správnou funkci neuronové sítě, proto byly trénovací vzory získávány měřením na reálném laboratorním systému. Celkem bylo shromážděno 90 000 trénovacích vzorů, přičemž pro účely trénování bylo použito 30 000 dat. Některá zbylá data byla využita pro testování chování natrénované neuronové sítě.

3 Regulační struktura

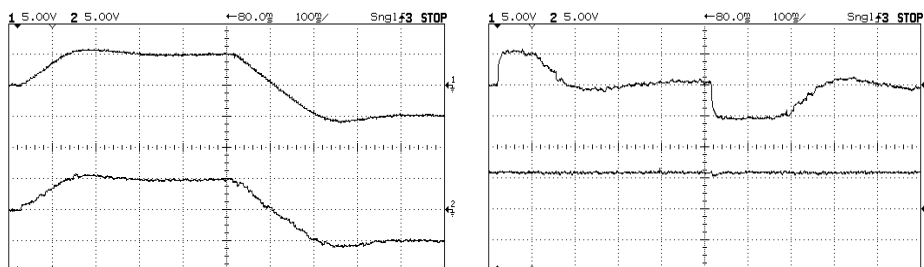
Struktura navrženého bezsenzorového vektorově řízeného pohonu je uvedena na obr. 1. Jednotlivé fázové proudy jsou získány pomocí proudových snímačů LEM a jsou dále transformovány pomocí bloku transformace T3/2 do dvouosého systému statorových souřadnic $[\alpha, \beta]$. Vektorové natočení do dvouosého rotujícího systému orientovaných souřadnic $[x, y]$ se provádí v bloku BVN2. Výstup tvoří skutečné složky vektoru statorového proudu i_{Sx} a i_{Sy} . Tyto jsou pak použity jako zpětnovazební veličiny pro proudové regulátory. K výstupům těchto regulátorů jsou přičítány složky u_{xe} a u_{ye} pro odvazbení (BZV). Dále se signály vedou do bloku vektorového natočení BVN1, kde se zpět transformují za pomoci orientujícího úhlu γ do systému statorových souřadnic. Odtud již vedou do bloku vektorové modulace s umělou neuronovou sítí (ANN-PWM), který zajišťuje řízení nepřímého měniče frekvence a tím realizuje na výstupu měniče požadovaný vektor statorového napětí. Pro získání orientujících veličin a magnetizačního proudu pak slouží blok vyhodnocení orientujících veličin BVOV založený na tzv. proudovém modelu. Pro chod v oblasti odbuzení je zařazen I - regulátor, který zpracovává regulační odchylku mezi žádanou a vypočtenou hodnotou modulu vektoru statorového napětí. Vypočtená hodnota se získává pomocí bloku vektorového analyzátoru VA z žádaných složek u_{Sx}^* a u_{Sy}^* .



Obr. 1. Struktura vektorového řízení bez použití snímače otáček

4 Experimentální výsledky

Umělá neuronová síť v aplikaci rychlostního estimátoru byla implementována do DSP TMS 320C40, který je základem mikroprocesorového řídicího systému ovládajícího nepřímý měnič frekvence s napětovým meziobvodem. Tento měnič pak napájí asynchronní motor o jmenovitém činném výkonu 2,7 kW.



Obr. 2. Průběhy skutečných a estimovaných otáček AM, momentotvorná a tokotvorná složka vektoru statorového proudu AM při rozběhu na 300 min^{-1} a následné reverzaci na -300 min^{-1} bez zatížení (měřítko otáček je $1 \text{ V} \approx 60 \text{ min}^{-1}$, měřítko proudu je $1 \text{ V} \approx 1 \text{ A}$)

Veličiny pro toto měření byly získány jednak z výstupu LEM čidel měniče a jednak vysíláním vnitřních proměnných řídicího mikropočítače na D/A převodník. Tyto veličiny pak byly měřeny osciloskopem Hewlet Packard HP 54601A. Neuronovou sítí estimovaná rychlost asynchronního motoru byla využita jako vstup do rychlostního regulátoru ve struktuře vektorového řízení (experimentální výsledky viz obr. 2).

5 Závěr

V tomto příspěvku bohužel není dostatek prostoru pro prezentaci dosažených výsledků během mého doktorského studia, z tohoto důvodu uvedu alespoň stručně dílčí výsledky. Nejprve jsem se zabýval řídicími systémy s umělou neuronovou sítí pro stejnosměrný motor napájený z pulsního měniče. Dále se práce zaměřuje na aplikace ve střídavých regulačních pohonech s asynchronním motorem, které byly nejprve simulovány a následně implementovány na reálný elektrický pohon. Je prezentována nová metoda vektorové pulsně-šířkové modulace (VPWM) s kompetitivní neuronovou sítí pro řízení nepřímého měniče frekvence s napěťovým meziobvodem. Práce s VPWM pak byla zakončena její implementací do struktury vektorového řízení asynchronního motoru.

V závěru je práce směřována na aplikaci neuronové sítě jako otevřeného estimátoru rychlosti pro vektorové řízení asynchronního motoru. Dílčí část výsledků je prezentována v tomto příspěvku. Je nutné zdůraznit, že veškerá trénovací data byla měřena pro stav bez zatížení, přesto byl použit rychlostní estimátor schopen správného odhadu i v tomto stavu. Neuronová síť prokázala jednu ze svých základních vlastností, a to schopnost zevšeobecnění. Rozsah odhadu rotorové rychlosti není nijak omezen, záleží na konkrétních potřebách v dané aplikaci a tomu odpovídajícím shromážděným trénovacím vzorům. Pro účely implementace bylo vytvořeno makro pro práci s neurony se sigmoidní aktivační funkcí a celý program byl upraven tak, aby bylo možné jednoduchým způsobem vyměnit váhy jednotlivých neuronů, a tedy operativně měnit strukturu i váhové matice neuronové sítě. Rovněž bylo vytvořeno stanoviště pro sběr trénovacích vzorů a trénink neuronové sítě.

Seznam autorových prací

1. Kuchař, M.: *Mikroprocesorové řízení proudového střídače*, Diplomová práce, VŠB-TU Ostrava, 2000.
2. Brandštetter, P., Kuchař, M., Pavelek, T.: *Microprocessor Control of Induction Motor Drive with Current Inverter*, *TRANSCOM 2001*, Univerzita v Žilině, 2001, str. 79-82, ISBN 80-7100-847-8
3. Brandštetter, P., Kuchař, M.: *Various Control Systems of DC Drive using Artificial Neural Networks*, *IWCIT'01*, VŠB – TU Ostrava, 2001, str. 155-159, ISBN 80-7078-907-7

4. Brandštetter, P., Kuchař, M.: Direct Inverse Control of DC Drive using Artificial Neural Networks, *POSTER 2002*, ČVUT Praha, 2002
5. Brandštetter, P., Kuchař, M., Štěpanec, L.: Aplikace umělé inteligence v oblasti elektrických regulačních pohonů, *SYMEP 2002*, TU Liberec, 2002, str. 50-55, ISBN 80-7083-612-1
6. Brandštetter, P., Kuchař, M.: ANN Application in Control of the Induction Motor Drive with Vector Control, *Acta Metallurgica Slovaca*, ročník 8, číslo 4, 2002, str. 464-469, ISSN 1335-1532
7. Brandštetter, P., Kuchař, M., Palacký, P., Vinklárek, D.: Sensorless Induction Motor Drive with Vector Control, *EPE – PEMC 2002*, Cavtat & Dubrovnik, Croatia, 2002, ISBN 953-184-047-4
8. Brandštetter, P., Kuchař, M.: Control of DC Drive using Artificial Neural Networks, *EPE – PEMC 2002*, Cavtat & Dubrovnik, Croatia, 2002, ISBN 953-184-047-4
9. Brandštetter, P., Kuchař, M.: Vektorová pulsně – šířková modulace pro napěťový střídač využívající umělou neuronovou síť, *EE – odborný časopis pro elektrotechniku a energetiku*, Trenčín, 2002, str. 43-45
10. Kuchař, M.: ANN-based VPWM for Voltage Source Inverter, *Elektrotechnika a informatika 2002*, ZČU v Plzni, Zámek Nečtiny, 2002
11. Brandštetter, P., Kuchař, M., Štěpanec, L.: Aplikace umělé inteligence v řízení elektrických regulačních pohonů, *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava*, řada elektrotechnická, číslo 1/2003, ročník VI, str. 1-10, ISBN 80 – 248 – 0223 – 6
12. Brandštetter, P., Kuchař, M.: DSP Implementation of ANN-based VSI-VPWM, *POSTER 2003*, ČVUT Praha, 2003
13. Brandštetter, P., Kuchař, M.: Development and DSP Implementation of ANN-based VPWM in a Voltage Source Inverter, *TRANSCOM 2003*, Univerzita v Žilině, 2003, str. 31-34, ISBN 80-8070-080-X
14. Brandštetter, P., Fišer, O., Kuchař, M.: Simulation of Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor (DTC of PMSM), *TRANSCOM 2003*, Univerzita v Žilině, 2003, str. 95-98, ISBN 80-8070-080-X
15. Brandštetter, P., Kuchař, M.: Development and DSP Implementation of ANN-based VPWM in a Voltage Source Inverter, *odborný časopis COMMUNICATIONS*, TRANSCOM 2003 - publication of the selected contributions, Univerzita v Žilině, 2003
16. Brandštetter, P., Kuchař, M., Palacký, P.: Vector Control of Induction Motor Drive using ANN-based VPWM, *EPE 2003*, Toulouse, Francie, 2003, ISBN 90-75815-07-7
17. Brandštetter, P., Kuchař, M.: Vector Controlled Induction Motor Drive using ANN-based VPWM, *EDPE 2003*, Vysoké Tatry, Slovensko, 2003
18. Brandštetter, P., Kuchař, M.: Vektorově řízený pohon s rychlostním estimátorem založeným na přímé umělé neuronové síti, *ELOSYS 2003*, Trenčín, 2003
19. Brandštetter, P., Kaduch, M., Kuchař, M.: Sensorless Vector Control of Induction Motor with Neural Network, *Ee 2003*, Novi Sad, Srbsko a Černá Hora, 2003

Řešené grantové projekty

1. CEZ: J17/98:272400014 – Výzkum prostředků pro zvyšování jakosti elektrotechnických produktů, dílčí úkol s názvem: Optimalizace elektromechanické přeměny elektrické energie, 2001 – 2003, (člen řešitelského týmu).
2. LN00B029 – Materiálově-technologické výzkumné centrum – dílčí úkol: Výzkum nových metod řízení střídavých regulačních pohonů, 2002 – 2003, (člen řešitelského týmu).
3. FRVŠ 496/2002 – Řídicí aplikace neuronových sítí v elektrických regulačních pohonech, 2002, (zodpovědný řešitel)

Reference

1. Brandštetter, P.: *Střídavé regulační pohony - moderní způsoby řízení*, VŠB-TU Ostrava, 1999, ISBN 80-7078-668-X
2. Demuth, H., Beale, M.: *Neural Network Toolbox for Use with Matlab*, User's Guide version 4, The MathWorks, Inc., 2001
3. National Instruments: *DAQ 6023E/6024E/6025E User Manual*, Multifunction I/O Devices for PCI, 2000
4. Neborák I.: *Modelování a simulace elektrických regulovaných pohonů*, VŠB-TU Ostrava, 2002, ISBN 80-248-0083-7
5. Texas Instruments: *TMS 320C40*, Digital Signal Processing Product, 1995
6. Vas, P.: *Artificial-Intelligence-Based Electrical Machines and Drives*, Oxford Science Publication, New York, 1999, ISBN 0-19-859397-X

Annotation

Sensorless Vector Control of Induction Motor using ANN-based Speed Estimator

Rotor position and speed sensors are required for vector control of induction motor. Because there are some applications in industry, where these sensors cannot be used, sensorless control technique should be used. In this paper rotor speed estimator are considered, which is based on feedforward artificial neural network. It is demonstrated that such estimator, in contrast to conventional model-based approaches, does not depend on a knowledge of machine parameters. It is further shown that accurate estimates can be obtained in situation of varying load without the need for explicit load monitoring. The speed estimator has been implemented into vector control of induction motor and it has been obtained experimental results from the real drive. For the implementation purposes it is used DSP TMS 320C40.

Acknowledgement

In the paper there are the results of the project LN00B029, which was supported by The Ministry of Education of Czech Republic. This research was supervised by Prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.