

MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ V OBVODECH S PWM ŘÍZENÝMI ZDROJI NAPĚTÍ

Electric Parameter Measurement in PWM Powered Circuits

Martin Novák, Marek Čambál, Jaroslav Novák

Abstrakt: V článku je věnována pozornost možnostem jednoduché implementace metod pro číslicové měření elektrického výkonu v ustálených stavech a při pomalých přechodných dějích v obvodech napájených ze zdrojů, jejichž výstupní napětí je formováno šířkově pulsní modulací. V článku jsou prezentovány možné koncepce měřicích zařízení a výsledky zkušebních měření.

Key words: Digital measurement, PWM powered circuit, Electric power

1. Úvod

Na našem pracovišti se zabýváme metodikou měření elektrických výkonů v ustálených stavech pomocí jednoduchých číslicových prostředků nebo pomocí prostředků pro řízení, kde je měření výkonu doplňkovou funkcí. Cílem není dosažení extrémní přesnosti, ale spíše realizace metody, implementovatelné na robustním hardwarovém vybavení s komponenty, které jsou standardní v řídicích aplikacích a s možností elektrických či datových výstupů. Popisované prostředky a metody jsou použitelné jako podpora při vývoji a testování systémů pracujících s pulsním napájením. Další oblastí využití jsou jednoduchá měření v ustálených stavech v obvodech se standardními, průmyslově vyráběnými, zdroji pulsního napájení. Některé tyto zdroje, například typicky frekvenční měniče pro asynchronní motory, jsou vybaveny diagnostikou, poskytující údaje o výstupních veličinách. I v těchto případech jsou však prezentované postupy a prostředky použitelné pro provádění nezávislých měření nebo například při měřeních v soustavách s paralelním napájením více elektromotorů z jednoho měniče.

2. Snímače

Cílem je zjištění elektrického výkonu při použití robustních hardwarových komponent, které jsou standardní i ve zpětnovazebních řídicích aplikacích. Vyhodnocení výkonu se provádí v číslicových obvodech jeho výpočtem ze vzorků proudů a napětí. Ve zpětnovazebních regulačních soustavách, realizujících elektronické řízení elektrických či elektromechanických systémů, se pro měření napětí a proudů používají velmi často galvanicky oddělené snímače s Hallovou sondou, které pracují na principu kompenzace magnetických účinků měřeného proudu či proudu, který je úměrný měřenému napětí. V našich zařízeních se nám osvědčily snímače od firmy LEM. Pro měření proudů a napětí v nízkonapěťových obvodech s výkony do přibližně 15 kW používáme nejčastěji proudové snímače LA55P a napěťové snímače LV25P.

Snímače LV25P se typicky používají pro měření vstupních napětí střídačů a pulsních měničů. Pro tyto aplikace, kde je měřené napětí stejnosměrné, filtrované kondenzátorem s velkou kapacitou, je použití snímačů bezproblémové. V obvodech, ve kterých se uplatňují zdroje pracující se šířkově pulsní modulací, není možno pomocí popisovaných snímačů měřit průběh okamžité hodnoty, neboť snímač průběh v podstatě filtruje. Nicméně, jak bude uvedeno v dalším textu, jsou snímače použitelné pro vyhodnocování výkonových poměrů v ustálených stavech i ve spojení s běžnými prostředky mikroprocesorového řízení se vzorkovacími frekvencemi vycházejícími z period výpočtů regulačních algoritmů pro řízení výkonových polovodičových měničů.

V obvodech se sinusovým napětím s frekvencemi do 50Hz jsou snímače LV25P použitelné k měření, vzhledem ke zpoždění odezvy však v těchto obvodech nejsou použitelné pro přesnou synchronizaci řízení měničů.

3. Možnosti číslicového vyhodnocení elektrického výkonu

Pro okamžitou hodnotu elektrického výkonu platí známý vztah:

$$p = u \cdot i \quad (1)$$

Při statických měřeních v obvodech s nekonstantními průběhy napětí a proudů se nejčastěji pracuje se střední hodnotou výkonu za periodu napětí, resp. proudu, pro kterou v případě číslicového vyhodnocení platí vztah:

$$P = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{i=n} u_i \cdot i_i \cdot \Delta t \quad (2)$$

Kde u okamžitá hodnota napětí, i je okamžitá hodnota proudu, p je okamžitá hodnota výkonu, P je střední hodnota výkonu, T je perioda, t je čas, Δt je perioda vzorkování a výpočtu a n je počet vzorků napětí resp. proudu za periodu, za kterou se počítá střední hodnota výkonu, platí tedy $T=n \cdot \Delta t$.

Má-li být číslicové určení výkonu dostatečně přesné, musí být splněn Kotelnikovův vzorkovací teorém, tj. proud a napětí musí být vzorkovány alespoň s dvojnásobnou frekvencí vůči frekvenci nejvyšší harmonické složky, která se v průběhu napětí resp. proudu vyskytuje.

Při vyhodnocování výkonů v obvodech napájených pulsními zdroji, kde jsou napětí nebo proudy snímány snímači na principu Hallovy sondy s elektronickou kompenzací a kde se k výpočtu výkonů používá prostředků mikroprocesorového řízení, tedy jednočipových mikrokontrolérů, je vysoká pravděpodobnost, že Kotelnikův teorém splněn nebude. Může potom docházet k situacím, kdy výpočet poskytuje v jednotlivých periodách rozdílné výsledky a to i v případě, že jsou reálné poměry v obvodu ve sledovaných periodách totožné. Příčinou je malá vzorkovací frekvence a možné zkreslení průběhů především napětí, ale i proudů, snímači. V popsaném měřicím řetězci není reálné zjištění správných hodnot výkonů po každé periodě. Statickou hodnotu výkonu je však možno určit výpočtem definičního integrálu, respektive sumy, za dobu několika period základní harmonické napětí a proudu. Pro střední hodnotu potom bude platit vztah:

$$P = \frac{1}{k \cdot T} \sum_{i=1}^{i=k \cdot n} u_i \cdot i_i \cdot \Delta t \quad (3)$$

Ve vztahu (3) je k počet period základní harmonické napětí resp. proudu, za které se počítá střední hodnota výkonu. S rostoucím k poroste přesnost výpočtu střední hodnoty výkonu za předpokladu, že nedochází k výrazným interferencím mezi vzorkováním a měřeným průběhem. Jedná se vlastně o zpřesnění dané výpočtem střední hodnoty výkonu v ustáleném stavu jako průměrné hodnoty středních hodnot za k period. V oblasti obvodů s pulsním napájením je použití vztahu (3) aktuální především při výpočtech elektrických výkonů v ustálených stavech v obvodech s pulsními měniči nebo střídači či měniči frekvence. Při výpočtech se zpravidla uplatňuje skutečnost, že vlivem indukčností zátěže je v průběhu proudu výrazně vyjádřena základní harmonická. Je známou skutečností, že činný elektrický výkon je vždy vytvářen jen odpovídajícími si harmonickými složkami napětí a proudu. Z toho důvodu se ve výkonu v obvodech s pulsním napětím a s proudy výrazně filtrovanými indukčnostmi uplatňuje prakticky jen základní harmonická napětí. Při měření výkonů v obvodech s pulsními měniči koresponduje tedy vypočtený výkon s výkonem stejnosměrných složek napětí a proudu. Základní perioda výpočtu T je u pulsního měniče dána periodou jeho spínání. U měničů se střídavým výstupem poskytuje výpočet výkon daný první harmonickou proudem a napětím.

Specifickou skupinu úloh tvoří výpočty výkonů v třífázových soustavách s pulsními zdroji napětí. Typicky se jedná o obvody napájené z měničů frekvence, které pracují s šířkově pulsní modulací a které se používají nejčastěji pro napájení regulovaných elektrických pohonů s asynchronními a synchronními motory. Nemá-li měřicí systém informaci o okamžité výstupní frekvenci měniče, je nereálné bez frekvenčních analýz a vysokých vzorkovacích frekvencí provádět jednoduchý výpočet výkonu po každé periodě podle vztahu (2). Možnosti výpočtu statického výkonu jsou v tomto případě, kdy není exaktně známa frekvence první harmonické proudu a napětí a kdy jsou napětí i proud zatíženy vyššími harmonickými složkami, v podstatě dvě.

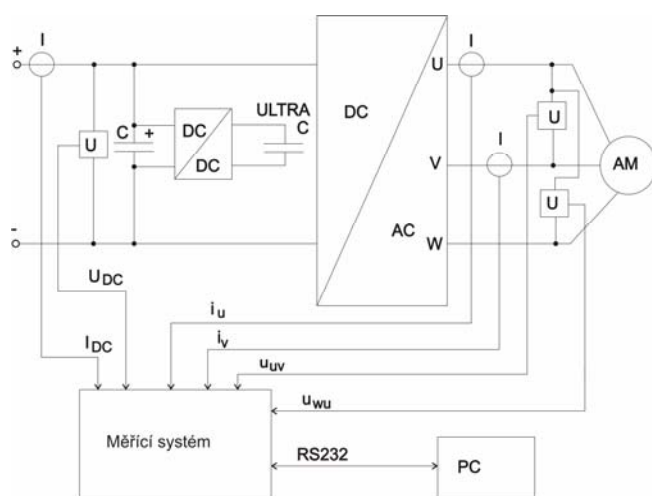
První možností je přímá aplikace vztahu (3) v třífázové soustavě. V obvodech s pulsními zdroji není zpravidla vhodné vycházet z předpokladu souměrnosti zdroje a zátěže a proto je nutno měřit třífázový výkon buď měřením výkonu ve všech fázích nebo pomocí Aronova zapojení. Při měření ve všech fázích je celkový třífázový výkon dán vztahem:

$$P = \frac{1}{k \cdot T} \sum_{i=1}^{i=k \cdot n} u_{ui} \cdot i_{ui} \cdot \Delta t + \frac{1}{k \cdot T} \sum_{i=1}^{i=k \cdot n} u_{vi} \cdot i_{vi} \cdot \Delta t + \frac{1}{k \cdot T} \sum_{i=1}^{i=k \cdot n} u_{wi} \cdot i_{wi} \cdot \Delta t \quad (4)$$

Ve vztahu (4) jsou indexy u, v, w , označeny vzorky proudů a napětí v jednotlivých fázích. Při neznámé hodnotě frekvence první harmonické napětí a proudu je nutno volit dostatečně velkou hodnotu k , aby se ve výsledné hodnotě výkonu prakticky neprojevila nepřesnost daná výpočtem střední hodnoty na pravděpodobném neceločíselném počtu period. V rovnici (4) je výpočet prováděn na základě znalosti fázových napětí. Je-li zdrojem napětí třífázový můstkový střídač a je-li zátěž zapojena do trojúhelníka, nejsou fázová napětí přímo měřitelná. V tomto případě je nutno použít zapojení měřících elementů s umělou nulou, nebo, což je vhodné u elektronických měřících programovatelných systémů, měřit dvě napětí sdružená a z nich fázová napětí dopočítat.

4. Příklad implementace měření výkonu do systému pro řízení výkonových měničů

Na Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze byl navržen a opakovaně realizován univerzální systém pro řízení výkonových měničů, především pro elektrické pohony. Systém je založen na použití DSP regulátoru s mikrokontrolérem TMS 320F240. Jednou z aplikací byla implementace číslicových algoritmů pro měření stejnosměrného a třífázového elektrického výkonu. Zajímavé využití této aplikace bylo při proměňování účinností komponent laboratorního modelu hybridního pohonu v laboratoři Katedry elektrických pohonů a trakce Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

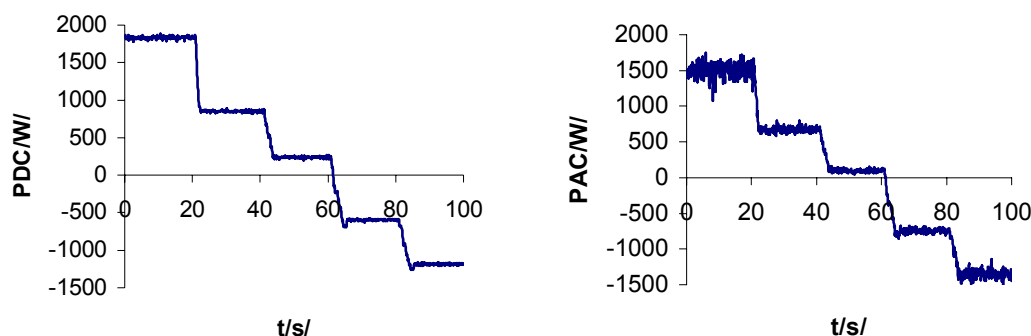


Obr. 1 Měření výkonů na komponentech modelu hybridního pohonu

Na obr. 1. je zapojení části obvodu při provádění výše uvedených měření. Na stejnosměrné straně byl obvod napájen ze stejnosměrného dynama. Na této straně byly prováděny testy účinnosti při přenosu a akumulaci energie v systému superkondenzátor (ultracapacitor) – pulsní měnič (DC/DC). Měřícím systémem byl zjišťován výkon a jeho integrál, tj. energie, při řízeném nabíjení a vybíjení superkondenzátoru přes pulsní měnič. Elektrický výkon byl určován prostřednictvím definičního vztahu (1). Bylo vyhodnocováno, kolik energie je

možno zpětně ze superkondenzátoru odebrat při různých nabíjecích a vybíjecích výkonech. Tato měření byla prováděna v rámci výzkumu možností rekuperace brzdové energie na vozidlech s elektrickými a hybridními pohony.

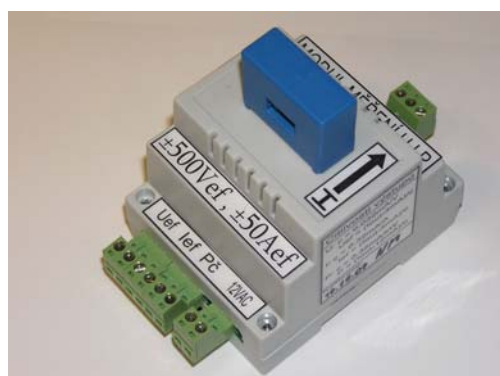
Příkladem dalšího měření je zjišťování elektrického výkonu na vstupu a výstupu střídače trakčního motoru modelu hybridního pohonu. Vzhledem k poměrně malé periodě vzorkování a výpočtu 0,5ms a vzhledem k použitým snímačům napětí LV25P byla hodnota výkonu významně filtrována vlečeným číslicovým filtrem prvního řádu s časovou konstantou přibližně 0,5s. Tím bylo možno zachytit průběhy výkonu jen v ustálených stavech nebo při pomalých přechodných dějích. Příklady výstupů těchto měření jsou na obr. 2.



Obr. 2. Příklady výsledků měření elektrických výkonů na vstupní a výstupní straně střídače

5. Elektronické moduly pro měření výkonu a jejich testování na frekvenčně řízeném pohonu

Pro účely realizace měřících bodů v technologickém zázemí laboratoří, pro účely výzkumu a výuky byly navrženy a realizovány jednoduché mikroprocesorové měřící moduly pro měření střední hodnoty výkonu a efektivní hodnoty proudu a napětí. Vstupními veličinami modulu jsou jeden proud a jedno napětí. Proud je snímán snímačem LA55P, napětí snímačem LV25P. Tyto typy snímačů byly voleny zejména z důvodu robustnosti. Modul poskytuje na svém výstupu odpovídající údaj výkonu a efektivní hodnoty proudu. Modul má proudové výstupy s rozsahem 4 až 20 mA. Jako výpočetní člen je použit mikrokontrolér C8051F300 od firmy Silabs. Vzorkovací perioda A/D převodníku a výpočtu je 2 μ s. Střední hodnota výkonu a efektivní hodnota proudu a napětí jsou počítány za dobu 2s. Modul byl cejchován na výpočet výkonu při sinusovém proudu a napětí.



Obr. 3 Mikroprocesorový modul pro měření výkonu a efektivní hodnoty proudu a napětí – na obrázku je patrný průvlekový snímač proudu LA55P

Vybrána skupina výsledků z měření výstupního elektrického výkonu nepřímého měniče frekvence, který napájel asynchronní motor zatížený stejnosměrným dynamometrem. Specifikace komponent použitých při měření a jejich zapojení je následující: Frekvenční měnič Siemens Master Drives VC, 3x400V, výstupní proud 10,2A, poskytuje údaj výstupního výkonu P_{FM} : Asynchronní motor 3x380V; 9,6A; 4,4kW; 50Hz; 1370 ot/min P_{02} : elektrodynamický wattmetr Metra Blansko s třídou přesnosti 0,2 – použity dva wattmetry v Aronově zapojení, proudové okruhy připojeny přes měřící transformátory proudu, třída přesnosti 0,2 P_{05} : elektrodynamický wattmetr Metra Blansko s třídou přesnosti 0,5 – použity dva wattmetry v Aronově zapojení, proudové okruhy připojeny přes měřící transformátory proudu, třída přesnosti 0,2 P_M : výše popsany mikroprocesorový měřící modul s čidly LA55P a LV25P, použity dva moduly v Aronově zapojení P_S : elektronický třífázový wattmetr určený pro měření v obvodech se sinusovým napájením, typ PMP3, výrobce ELKO Štřovice a.s., proudy ve třech fázích měřeny přes měřící transformátory s třídou přesnosti 0,2

Mechanický výkon motoru na hřídeli P_{mech} byl určen z momentu dynamometru a naměřených otáček.

$f[\text{Hz}]/f_{\text{PWM}}[\text{kHz}]$	$P_{\text{FM}}[\text{W}]$	$P_{02}[\text{W}]$	$P_{05}[\text{W}]$	$P_{\text{M}}[\text{W}]$	$P_{\text{mech}}[\text{W}]$	$P_{\text{S}}[\text{kW}]$	$\eta_{\text{M}}[-]$	$\eta_{\text{FM}}[-]$
30/5	2737	2880	2880	2789	2002	2.8-3.2	0.72	0.73
30/8	2864	2910	2960	2765	1970	2.5-3.2	0.71	0.69
40/2	3549	3720	3920	3850	2803	3.4-4.8	0.73	0.79
40/5	3650	3750	3840	3617	2787	3.0-4.8	0.77	0.76
40/8	3711	3750	3760	3578	2755	3.0-4.4	0.77	0.74
40/10	3802	3780	3800	3453	2739	3.6-4.4	0.79	0.72
50/5	4461	4620	4760	4664	3604	4.5-5.2	0.77	0.81

Lze konstatovat, že odpovídající údaje spolu v tabulce korespondují, avšak s nepříliš velkou přesností, v některých případech s odchylkou nad 5%. Relace mezi údajem měniče a mikroprocesorových modulů je dána spínací frekvencí, údaje elektrodynamických wattmetrů mají tendenci překračovat údaje mikroprocesorového modulu, avšak tato tendence není jednoznačná.

6. Závěr

Z provedeného rozboru je zřejmé, že přesné měření elektrického výkonu v obvodech s pulsními zdroji napětí není triviální záležitostí a při požadavku dosažení vyšší přesnosti nelze použít standardní elektrodynamické wattmetry cejchované na sinusové průběhy ani jednoduché prostředky pro elektronické vyhodnocování výkonu. Na druhou stranu jsou však tyto prostředky a metody použitelné pro řadu technických měření a indikací s přesností přibližně okolo 5%. Není-li požadavek elektrického výstupu měřidla, jsou v této oblasti použitelné i ručkové elektrodynamické wattmetry.

References

- [1] NOVÁK, J. 2007 *Prostředky pro mikroprocesorové řízení elektrických pohonů - 3. část*. Elektro.2007, roc. 17, c. 7, s. 4-6. ISSN 1210-0889.
- [2] ČEŘOVSKÝ, Z.; MINDL, P.; PAVELKA, V.; DREŠER, J.; NOVÁK, J. 2004 *Hybridní pohon se superkapacitorem*. Sborník příspěvků z konference XVI. oborový den vědeckých a pedagogických pracovníků vysokých škol. Liberec: Technická univerzita, 2004, díl 1, s. 41-46. ISBN 80-7083-895-7
- [3] NOVÁK, J.; GREGORA, S.; SCHEJBAL, V. 2004 *Real Time Torque and Power Analyses of Electromechanical Systems*. EPE-PEMC 2004 [CD-ROM]. Riga: Riga Technical University, 2004, vol. 6, ISBN 9984-32-070-7
- [5] NOVÁK, J. 2004 *Systém pro měření výkonových poměrů elektromechanických soustav*. CVUT FEL, Katedra elektrických pohonů a trakce, 2004
- [6] NOVÁK, J. 2003 *Programovatelné zařízení pro testování elektromechanických soustav v reálném case*. XXVIII. celostátní konference o elektrických pohonech. Praha: Česká elektrotechnická společnost, 2003, s. 305-310. ISBN 80-02-01563-0.
- [7] NOVÁK, J.; GREGORA, S.; SCHEJBAL, V. 2003 *Hardware for Real-Time AC Drive Analyses*. Electrical Drives and Power Electronics [CD-ROM]. Košice: Technical University of Košice, 2003, p. 380-383. ISBN 80-89061-77-X.