

Aktivní kompenzace harmonických v průmyslových aplikacích

Sergej Kalaschnikow, Steffan Hansen, Lucian Asiminoaei, Henrik Gedde Moos, Danfoss Drives A/S

V průmyslových napájecích sítích nízkého a středního napětí byly a jsou pasivní filtry a kapacitní filtry PFC tradičně používány ke zlepšení jejich kvality. Tyto filtry však nemohou být dimenzovány pouze pro zatížení, jež má být kompenzováno, neboť jsou ovlivněny harmonickými proudy z jiných nelineárních zátěží nebo vyššími harmonickými z napájecí sítě. Oproti tomu aktivní harmonický kompenzátor (AHC) je možné používat ke zlepšení kvality napájení bez nutnosti zabývat se problémy, které jsou spojeny s aplikacemi pasivních filtrů.

Navrhovaná aktivní kompenzace harmonických pro průmyslové síť (AHC) může být úspěšně použita pro nelineární zatížení, pro spotřebiče s rapidní fluktuací reaktivní a činné spotřeby energie. AHC filtr může být s výhodami použit i ke zlepšení kvality napájecí sítě pro další připojená zařízení, jež jsou na stejné napájecí síti jako AHC. Hlavními výhodami AHC jsou především redukce zkreslení, poklesů a změn napájecího napětí (tzv. flicker efekt) a také stabilizace síťového napájecího napětí. To vede ke zvýšení kvality napájecího napětí v průmyslových sítích a efektivnější kompenzaci síťového napětí ve srovnání s pasivními filtry a PFC.

Výhody AHC

Použití aktivní kompenzace sítě (AHC – *Activ Harmonic Compensator*) má v porovnání s pasivní kompenzací mnoho výhod:

- je snadné navrhout jej dle dané aplikace, neboť je nezávislý na impedanci vedení,
- negeneruje rezonance,
- aktivně omezuje a kontroluje harmonické i jalové (reaktivní) proudy.

Řešení AHC nabývá na významu

Navzdory výhodám mají AHC omezený podíl na trhu hlavně kvůli vysokým pořizovacím nákladům. Ale trendy při návrhu systémů průmyslových napájecích sítí a další faktory z oblasti výroby elektrické energie ukazují na to, že přichází doba změn:

- vývojové novinky spolu s masovou výrobou polovodičových součástek významně redukuje výrobní, a tedy i pořizovací náklady aktivního filtru;
- v důsledku velkého objemu mědi a oceli použité v pasivních filtrech má nárůst nákladů na výrobní materiál větší dopad na pasivní řešení než na aktivní řešení.

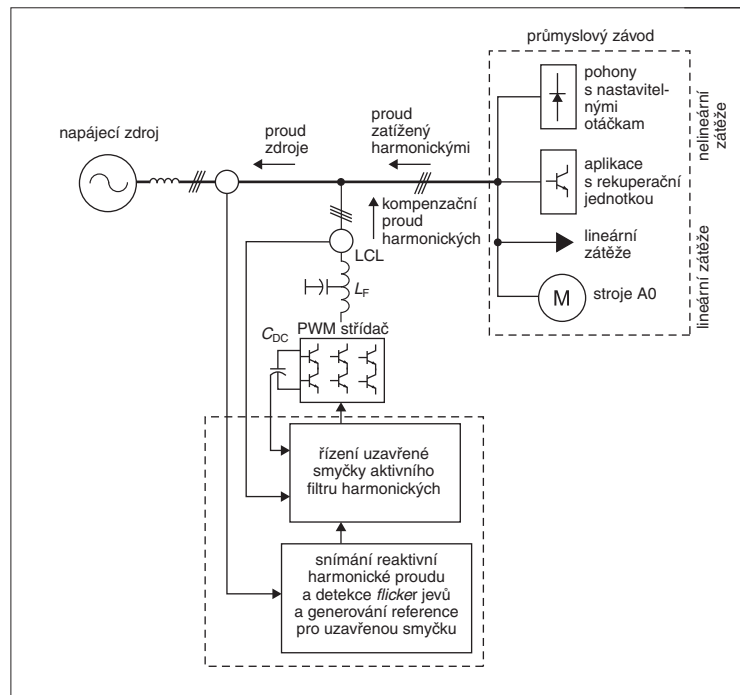
Na obr. 1 je znázorněn blok diagram AHC. Třífázový střídač je připojen mezi zdroj napájecího napětí a průmyslovou síť.

Průmyslový závod může obsahovat různé typy elektrických zařízení a zátěží rozdělených na lineární zátěž (rekuperační energetické jednotky, činná zatížení, stroje na stří-

řící proud) a nelineární zátěž (pohony s proměnnými otáčkami, obloukové jednotky atd.).

Aktivní harmonický filtr má za úkol detekovat harmonické proudy a generovat kompenzující proud, který ruší harmonickou slož-

pětí. Regulátor proudu nastavuje výstupní napětí ze střídače pro každou vzorkovací periodu řídicího systému tak, aby síťový proud měl referenční hodnotu. Regulátor napětí kontroluje hladinu stejnosměrného napětí tak, aby mělo téměř konstantní hodnotu. Výstupní signál regulátoru stejnosměrného napětí určuje hodnotu aktivního proudu zatížení sítě a ztrát energetické jednotky regeneračního systému. Reakční proud je vypočten podle jalového (reakčního) výkonu a informací z modulu pro vyhodnocení blikavých jevů v síti.



Obr. 1. Schéma elektrického zapojení aktivního harmonického filtru AHC napojeného na průmyslový závod

ku, přičemž zachovává první (základní) harmonickou proudy odebíraného ze zdroje. Řízení AHC se skládá z uzavřené regulační smyčky proudu střídače, ze stejnosměrného obvodu a z obvodu pro detekci a generování kompenzačního proudu. Z uvedeného vyplývá, že v závislosti na aplikaci může AHC provádět redukci harmonických, kompenzaci jalového proudu nebo zmírnění flicker-jevu (tzv. blikání v síti).

Systém řízení

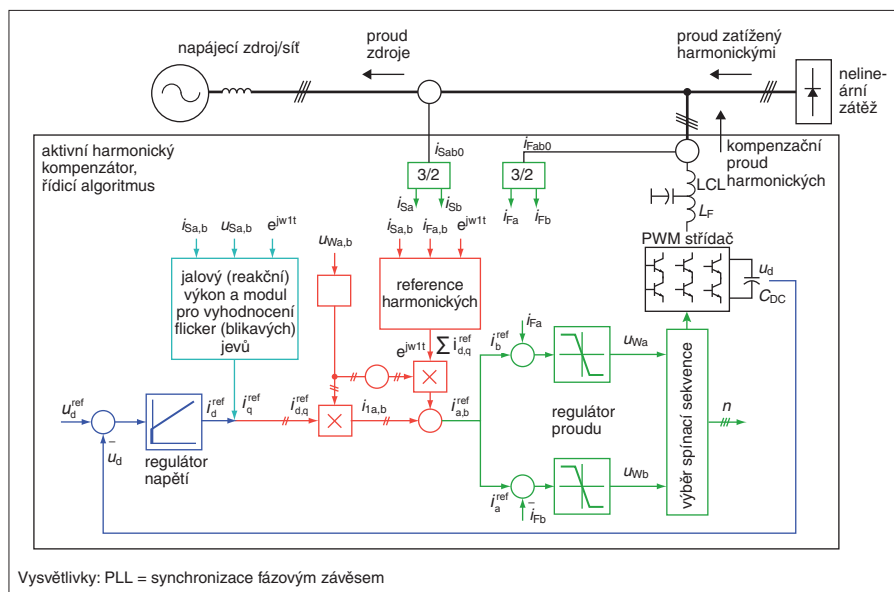
Na obr. 2 je blok diagram řídicí jednotky AHC. Řízení celého AHC je založeno na kaskádním řízení s regulací proudu ve vnitřní smyčce bez snímačů síťového na-

Pro omezení vysokofrekvenční pulzace síťového proudu z AHC je zde mezi sítí a AHC připojen vysokofrekvenční filtr LCL.

Řízení proudu

Řízenou hodnotou smyčky proudového regulátoru je dodávaný proud. Tento proud je výsledkem součtu naměřeného zátěžového proudu (viz obr. 1) a střídavého proudu měniče napětí. Tyto dva trojfázové proudy jsou spojeny v jeden celek a pak jsou transformovány na signál dvoufázových množství $i_{Sa,b}$. Na obr. 2 je tento proud reprezentován jako i_{Sa} a i_{Sb} .

Referenční hodnota regulátoru elektrického proudu $i_{d,q}^{ref}$ (složky d a q) je transformo-



Obr. 2. Blokový diagram řídicí jednotky

vána do stacionární soustavy souřadnic a–b. Transformace vektoru $i_{d,q}^{ref}$ na vektor i_{1ab} se provádí pomocí $e^{j\omega t}$, odvozené z fázové uzavřené smyčky PLL (viz obr. 2).

Výběr spínací sekvence pro každou spínací operaci obou zdrojů mění napětí se provádí použitím regulátoru klouzavého řízení.

Výběr spínací sekvence pro každou spínací operaci použitím modu klouzavého řízení je detailně probrán v literatuře [4] až [6]. Tímto způsobem je umožněno řídit aktivní filtr bez senzorů síťového napětí [7]. To významně zjednodušuje konfiguraci hardwaru aktivních kompenzátorů sítě, zejména pro aplikace středních a vysokých napětí.

Výstupní signály dvou proporcionálních regulátorů se saturací představují dvě složky vektoru síťového napětí u_{wa}, u_{wb} , jež jsou použity pro detekci polohy vektoru napětí pomocí synchronizace fázovým závěsem.

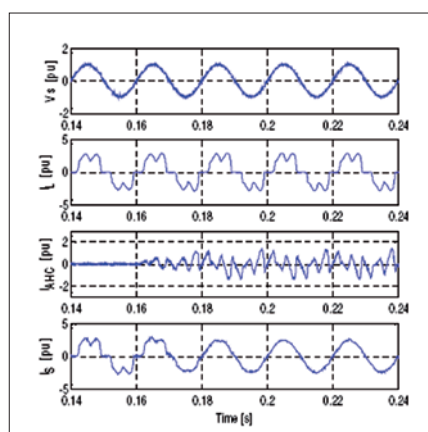
Pro kontrolu harmonických amplitud v síti je použit harmonický kalkulátor. Princip je založen na přímé harmonické metodě řízení. Tato metoda je stručně popsána v literatuře [2] a [3].

Ovládání stejnosměrného obvodu

Při nesinusovém síťovém proudu měniče napětí obsahuje el. napětí stejnosměrného obvodu nejenom zvlnění z operací při přepínání tranzistorů, ale také nízkofrekvenční zvlnění napětí, jaké se vyskytuje na stejnosměrné straně vedení diodového usměrňovače s kondenzátorem. Toto zvlnění nízkofrekvenčního napětí musí být filtrováno v řídicí smyčce návratem ke zdroji stejnosměrného napětí, jinak je třeba toto zvlnění napětí zvýšit úměrně podle regulátoru napětí a předat dále na regulační smyčku síťového proudu. Proto je síťové proudy třeba deformovat [8].

Pro snížení vlivu zvlnění napětí stejnosměrného obvodu na regulační smyčku proudu musí mít hraniční kmitočty zpětného filt-

ru pro dolní pásmo hodnotu $f_0 = 50$ až 75 Hz. Nízká hraniční frekvence zpětnovazebního filtru způsobuje v měření stejnosměrného napětí velké časové zpoždění, a proto má napětí stejnosměrného obvodu malý dynamický výkon.



Obr. 3. Výsledky simulace spuštění AHC

Pro zlepšení časové odezvy napětí stejnosměrného obvodu je použit adaptivní systém řízení, jehož parametrické hodnoty pro zpětnovazební filtr a proporcionální a integrační regulátor se mění v souladu s hodnotou chyby stejnosměrného napětí [8].

Výsledky simulace

Simulace kontroly AHC vykazuje velmi velkou dynamiku. Ta se zaprvé vyrovná svou dynamikou regulátoru elektrického proudu, který je charakteristický pro režim klouzavého řízení. Za druhé, v důsledku implementovaného adaptivního regulátoru stejnosměrného napětí může AHC mnohem rychleji překonat přechod během připojení/odpojení AHC nebo při změně zatížení harmonickými v síti.

Výsledek simulace je na obr. 3 (je zobrazena pouze jedna fáze).

Harmonický proud je generován typickým třífázovým diodovým usměrňovačem pohonu s proměnnými otáčkami. Jelikož účinnost dPF je blízko jedné, nevzniká v tomto případě potřeba kompenzace reaktivního výkonu. V čase 0,16 je AHC napojen na napájecí síť a začíná zmírňovat harmonické proudy z ASD. Přechod trvá téměř jednu základní periodu, dokud se zdrojový proud nezačne podobat sinusovému tvaru.

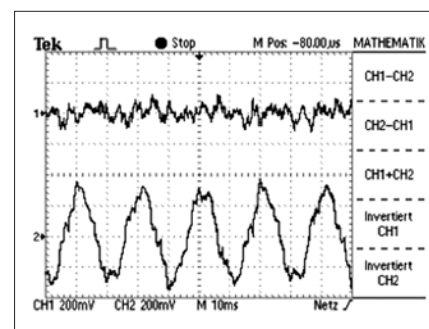
V důsledku své vysoké dynamiky je AHC schopen kompenzovat harmonické proudy v rámci základní periody. Zkreslení proudu nelineárního zatížení má THD 34 %, zatímco zdrojový proud dosahuje THD s hodnotou 4 %.

Příklady použití

AHC se provozuje jako velmi dynamicky řízený zdroj reakčního (jalového) proudu a díky speciálním řídicím algoritům je kompenzující reakční (jalový) proud dodán přesně ve správný okamžik. Zatížení sítě je tak menší a změny síťového napětí a deformace se snižují na bezpečnou hodnotu.

Zmírnění harmonických kmitů

V průmyslových rozvodech jsou pasivní filtry tradičně používány k pohlcování harmonických kmitů generovaných nelineárními zatíženími, a to primárně kvůli jejich nízkým nákladům. Je to velmi dobrý přístup, pokud je třeba také kompenzace účinnosti. Ale pasivní filtry mají také své jisté nevýhody, a proto je aplikace pasivních filtrů do průmyslových prostředí limitována. Oproti pasivnímu filtru může být aktivní filtr použit k redukci harmonických v průmyslových vedeních, aniž



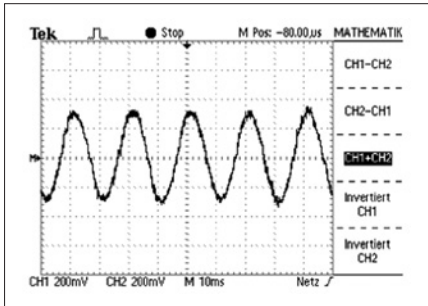
Obr. 4. Průběhy proudu AHC a měniče (10kV vedení, 20 A/div)

by bylo nutno starat se o problémy spojené s aplikací pasivních prvků [1].

Jednotka AHC umožňuje řídit kompenzaci harmonických a jalových (reakčních) proudů nezávisle na konfiguraci sítě a zatížením proudem a bez rizik spojených s přetížením kompenzátoru. Jednotka AHC může být rovněž dimenzována jen na kompenzaci harmonického zatížení, což vede k redukci nákladů na instalaci kompenzační jednotky.

Experimentální průběhy proudu na obr. 4, obr. 5 a obr. 6 ukazují velkou efektivitu

systemu AHC pro utlumení harmonických. Tyto průběhy byly naměřeny testováním jednotky AHC s jmenovitým výkonem 800 kvar v průmyslovém závodu. Jednotka AHC byla napojena na 10 kV síť pomocí transformátoru 10/0,4 kV.



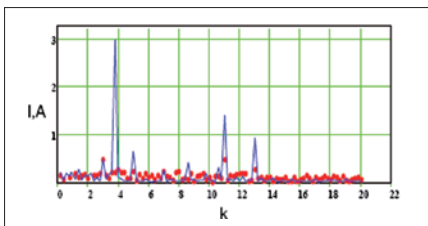
Obr. 5. Celkový proud vypočítaný z proudů zátěže (měniče) a proudu z AHC (20 A/div)

Bylo zjištěno, že aktivní filtr by měl adekvátně kompenzovat pět pohonů na střídavý proud napájených 12pulsním proudovým měničem dimenzovaným na 1,0 MW.

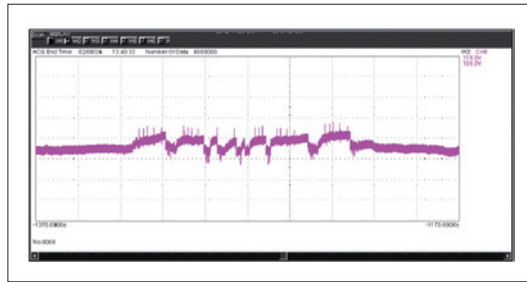
Obr. 4 ukazuje průběhy síťového proudu (jedna fáze) pohonu na střídavý proud (pouze jeden pohon) a fázového proudu (stejná fáze) AHC. Tyto proudy byly naměřeny na 10kV straně transformátoru. Síťový proud je zobrazen na obr. 5. Je to síťový proud, který je kalkulován osciloskopem z naměřených proudů na obr. 4. Z obr. 5 je vidět, že celkový síťový proud má prakticky sinusový a periodický tvar vlny. Vyšší harmonické 12pulsního měniče jsou prakticky eliminovány, jak je patrné ze spektrální charakteristiky proudu pohonu na střídavý proud a spektrální charakteristiky síťového proudu (viz obr. 6).

Flicker (blikavý) jev a snížení jeho vlivu

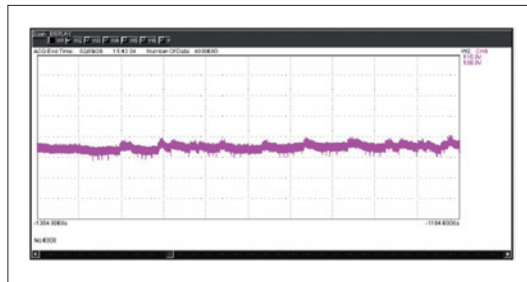
Blikavé jevy (šumy) způsobené velkými fluktuujícími zátěžemi jsou jedním z problémů kvality elektrické energie a způsobují výpadky nebo kolísání a případně i pokles el. napětí v síti. Kompensátory Static Var (SVC) řízené pomocí tyristorů jsou obvykle používány pro kompenzaci jalových (reakčních) proudů a ke snížení blikavých šumů (flicker-jevů). Jelikož operují na základní frekvenci, je kapacita SVC omezena [9]. Díky opoždění



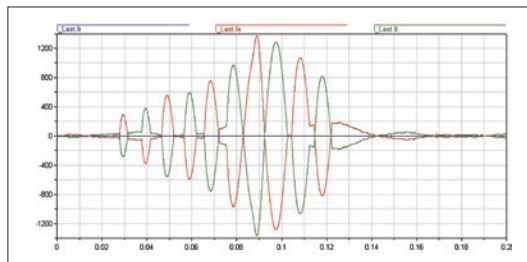
Obr. 6. Spektrální charakteristika pohonu na střídavý proud – plnou čarou) a celkového proudu – tečkovaně (amplituda základní harmonické není zobrazena, „k“ znamená počet harmonických)



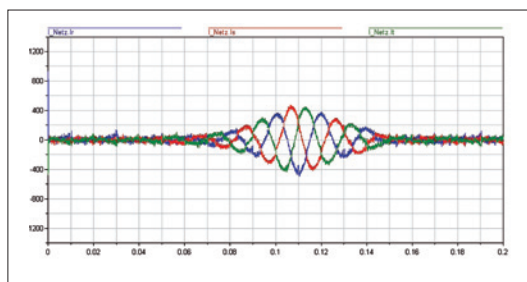
Obr. 7. Změny el. napětí v 11kV rozvodné síti bez AHC (1 V/div)



Obr. 8. Změny el. napětí v 11kV rozvodné síti s AHC (1 V/div)



Obr. 9. Tvarové kmity síťových proudů svařovacího stroje bez AHC (last = zatížení)



Obr. 10. Tvarové kmity síťových proudů svařovacího stroje s AHC (netz = síť)

pouze 2 ms je AHC velmi vhodný pro kompenzaci blikavých jevů.

Obr. 7 ukazuje naměřené změny el. napětí na 11kV síti během testu motoru bez kompenzační jednotky. Maximální změna síťového napětí byla přibližně 1,2%, což je u této frekvence již nad standardní limitní hodnotou blikavého jevu. Naměřená hodnota krátkodobého blikavého jevu $P_{st} = 1,5$.

Na obr. 8 je naměřená změna el. napětí ukázána na stejném testu motoru, avšak již s použitím AHC. Změna síťového napětí je přibližně 0,3% a leží jasně pod standardní limitní hodnotou. Naměřená hodnota krátkodobého blikavého jevu $P_{st} = 0,5$.

Kompenzace proudu svařovacího stroje

Na závěr přiblížení funkce AHC uvádíme příklad kompenzace proudu svařovacího stroje. Svařovací stroje jsou známy tím, že odebírají velmi nesinusový proud v krátkých časových periodách. Je obvyklý dokonce i nevyvážený síťový proud, kde jsou zatíženy pouze dvě fáze. Příkladem je obr. 9, kde jsou zatíženy pouze fáze „t“ a „s“ s proudovou špičkou 1 200 A, zatímco fáze „r“ zůstává nezatížena. Tvar proudu je nesinusový. AHC kompenzuje harmonická zkreslení, stejně jako nerovnováhu mezi fázemi, jak ukazuje obr. 10. Jelikož výsledek této kompenzace zaručuje rozdělení zatížení na všechny tři fáze, je špičkový proud výrazně menší, což podstatně zlepšuje kvalitu el. napětí. Špička proudu nad 1 200 A ve fázi „s“ je redukována na 400 A a vyrovnána na stejnou velikost ve všech třech fázích.

Literatura:

- [1] AKAGI, H.: *New Trends in Active Filters for Power Conditioning*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 6, pp. 1313-1322, 1996.
- [2] KALACHNIKOV, S.: *Three-phase rectifier for AC-Drives incorporated with Active Power Filter*. Proceedings of the International Power Electronics and Motion Conference, 1998, Prague, Czech Republic, pp. 2125-2130.
- [3] RUMMICH, E. – KALASCHNIKOW, S.: *Oberschwingungs- arme Netzeinspeisung von Windkraftanlagen mit Hilfe von aktiven Filtern*. e&i 117. Jg. 2000, H.2, pp. 129-133.
- [4] SABANOVIC, N. – SABANOVIC, A. – JEZERNIK, K. – KAYNAK, O.M.: *Current Control in three-phase switching Converters and ac electrical Machines*. In: Proceedings of IECON '94, Italy, 1994, pp. 581-586.
- [5] GAO, W. – WANG, Y. – HOMAIFA, A.: *Discrete-time variable Structure Control System*. In: IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 42, No. 2, pp. 117-122, 1995.
- [6] FERNANDO, J. – ORLANDI, E. – PAIS, M.: *Sliding Mode Control of Unity Power Factor Three Phase Boost Converters*. Proceedings of International Power Electronics and Motion Conference, 1998, Czech Republic, pp. 1125-1130.
- [7] Kalachnikov, S.: *Control of the Switch-Mode Rectifier without Mains Voltage Sensors*. SPE-EDAM '98, Italy, pp.125-128.
- [8] KALACHNIKOV, S. – BERGER, H.: *A New Control Strategy for DC-Link Voltage of a Three-Phase Bi-directional PWM Rectifier*. EPE '95, Spain , 1995, pp. 2558-2562.
- [9] Guillaume de Préville: *Flicker mitigation*. Application to a STATCOM, Proceedings of the European Conference on Power Electronics and Applications, 2001, Austria.