

Karel Hlava

Elektromagnetická kompatibilita trojfázového můstkového usměrňovače s R-C zátěží vůči napájecí síti

Klíčová slova: *trojfázový usměrňovač, odporově kapacitní zátěž, nesouměrné napětí, účinnky, harmonické odebíraného proudu.*

Úvod

Vlastnosti trojfázového usměrňovače z hlediska EMC vůči napájecí síti jsou mezi jiným dány též charakterem jeho zatěžovacího obvodu.

Trojfázový usměrňovač (dvanáctipulzní) trakčních měníren je zatěžován odběrem hnacích vozidel, jejichž náhradní schéma má charakter R-L obvodu.

V takovém případě se uplatní z hlediska EMC především úhel překrytí fázových proudů trakčního usměrňovače. Hodnota úhlu překrytí je závislá jak na zatěžovacím proudu, tak i na fázové reaktanci usměrňovačového transformátoru (dané jeho napětím nakrátko). Čím větší jsou hodnoty těchto veličin, tím je úhel překrytí větší.

Přibližně jeho polovina pak určuje posun základní harmonické fázového proudu vůči příslušnému napájecímu napětí, mající charakter zpoždění proudu za napětím. Protože usměrňovačový transformátor je zatěžován trakčním odběrem symetricky ve všech fázích, určuje polovina úhlu překrytí fázových proudů svým kosinem i účinník trakčního odběru.

Účinník základní harmonické trakčního usměrňovače měnírny má tedy vždy indukční charakter a jeho hodnota od jistého zatížení poněkud klesá s rostoucí hodnotou trakčního odběru. Napětí nakrátko usměrňovačového transformátoru bývá voleno tak, aby úhel překrytí při jmenovitém zatížení usměrňovače byl přibližně 25 elektr. stupňů. Z toho pak plyne hodnota účinníku samotného trakčního usměrňovače při jeho jmenovitém zatížení $\cos \varphi = \cos 12,5 = 0,976$, což přibližně odpovídá i hodnotám dosahovaným v provozu měníren ČD.

Ing. Karel Hlava, CSc., nar. 1930. Absolvent ČVUT Praha, specializace elektrická trakce. Vědecká hodnota získána v r. 1957. Zaměřen na otázky pevných trakčních zařízení a jejich EMC a na kvalitu elektrické energie. Do roku 1994 zaměstnán ve VÚŽ, nyní v DDC - TÚDC, S24.

Pro obsah harmonických proudů odebíraného trakčním usměrňovačem z napájecí sítě platí tzv. "amplitudový zákon", podle kterého poměrný obsah proudových harmonických je nepřímo úměrný řádovému číslu harmonické. Dvanáctipulzní usměrňovač trakčních měníren ČD má pro 11. harmonickou poměrný obsah v mezích od 9,1 % (pro dokonalé vyhlazení usměrňovaného proudu) do 8,8 % (pro bezindukční zatěžovací obvod), pro 13. harmonickou v mezích od 7,7 % do 7,2 %.

Činitel celkového harmonického zkreslení (THD) souhrnně popisuje zkreslení časového průběhu a je například podle EN 50160 [1] článek 1.3.21 definován pro napětí výrazem

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} (U_n)^2}$$

kde U_n je poměrná amplituda n -té harmonické napětí vztažená k amplitudě základní harmonické.

Analogický výraz se používá i pro proudy.

Pro dvanáctipulzní usměrňování vychází za předpokladu dokonalého vyhlazení usměrňovaného proudu hodnota THD = 13,3 %.

Šestipulzní usměrňovač má navíc v odebíraném proudu ještě 5. harmonickou s poměrným obsahem v mezích od 20 % do 18,6 % (podle stupně vyhlazení usměrňovaného proudu) a 7. harmonickou s obsahem v mezích od 14,3 do 11,3 %. Hodnota činitele celkového harmonického zkreslení vychází v tomto případě THD = 28,4 %.

Podstatně odlišné vlastnosti z hlediska EMC vůči napájecí síti má *trojfázový šestipulzní usměrňovač s odporově - kapacitní zátěží, tedy zatížený obvodem R-C*. Toto schéma se využívá na ČD ve vstupních obvodech statických měničů menších výkonů určených pro netrakovní účely, např. pro měniče napájecí obvodu zabezpečovací techniky. Rozboru vlastností tohoto obvodu je věnován tento příspěvek. Zvláštní pozornost je věnována vlivu amplitudové nesymetrie fázových napětí způsobované např. nesymetrickým zatížením napájecí sítě jinými odběry.

Metodika simulační studie

Cílem simulační studie je osvětlit elektrické a energetické poměry v modelovém obvodu. Konkrétně se jedná o následující otázky, které se týkají dvou základních okruhů, a to:

- A) napájecí napětí je souměrné, všechna tři fázová napětí jsou stejná a vzájemné fázové úhly jsou 120 stupňů,
- B) napájecí napětí fáze (L1) má zmenšenou hodnotu, původní hodnoty napětí fází (L2) a (L3) jsou zachovány, fázové polohy všech fázových napětí jsou zachovány.

V obou těchto okruzích otázek simulační studie analyzuje následující otázky:

1. jaký je časový průběh proudu odebíraného jednotlivými fázemi,
2. jaký je účinník základní harmonické odběru jednotlivými fázemi,
3. jaký je celkový účinník odběru všemi třemi fázemi,
4. jaké je spektrální složení proudu odebíraného jednotlivými fázemi (amplitudy a fáze 1. až 9. harmonické složky),
5. jaké hodnoty dosahuje činitel celkového zkreslení (THD) jednotlivých fázových proudů.

Jako podklad pro simulační studii vlastností trojfázového šestipulzního usměrňovače s R-C zatěžovacím obvodem byly vzaty údaje týkající se vstupních obvodů statického měniče s napěťovým stejnosměrným meziobvodem připojeného k trojfázové síti nn přímo bez transformátoru.

Hodnoty elektrických obvodových prvků jsou:

- indukčnost vstupní odrušovací tlumivky 33 μH
- kapacita kondenzátoru ve filtru usměrňovaného napětí 220 μF
- náhradní odpor zátěže zvolen 100 Ω (analogie obvyklého provedení)
- amplituda napájecího napětí fáze (L1) volena v mezích 300 až 400 V
- amplituda napájecího napětí fáze (L2) a (L3) zvolena 400 V

Pro simulační studii byly použity následující SW nástroje:

- a) Simulační program PSPICE verze 5 (získaný jako freeware z ČVUT Praha) po zavedení vstupních hodnot obvodových prvků poskytl amplitudy a fáze 1. až 9. harmonické odebíraných fázových proudů, hodnoty činitele celkového zkreslení (THD) a pro ilustraci též časové průběhy těchto proudů.

- b) Simulační program WorkBench PC pro Windows firmy Strawberry Tree (majetek ČD TÚDC S24, odd. EMC) pak po dosažení amplitud i fází napětí a amplitud i fází základní harmonické proudů dal všechny požadované elektrické a energetické hodnoty.
- c) Hodnoty činitele napěťové nesymetrie α_U byly určeny originálním SW odd. EMC na základě výsledků části b) pomocí vzorce převzatého z podkladu CIGRÉ a pojatého do návrhu PNE 33 3430-3 [9], čl. 4.1 jako vzorec č.3.

Výsledky simulační studie

V úvodu této části příspěvku jsou uvedeny dvě ukázky časového průběhu proudů, které analyzovaný usměrňovač odebírá z napájecí sítě. První ukázka na **obrázku 1** se týká případu, kdy je napájecí napětí souměrné, tedy jeho činitel napěťové nesymetrie $\alpha_U = 0$. Druhá ukázka na **obrázku 2** se týká případu, kdy došlo na jednom z fázových napětí k poklesu o 10 %, kdy činitel napěťové nesymetrie $\alpha_U = 3,45$ %.

Z těchto ukázek je patrné, že:

- proud odebíraný usměrňovačem je při zadaných parametrech přerušovaný a je vytvářen dvěma pulsy,
- v případě symetrického napájecího napětí je časový průběh všech tří fázových proudů stejný,
- v případě zvolené hodnoty napěťové nesymetrie se však časové průběhy fázových proudů liší.

Další energetické parametry sledovaného usměrňovače jsou analyzovány na souboru diagramů, sestavených pro sledovaný rozsah napětí fáze (L1) v mezích od 400 V do 300 V, tedy pro rozsah činitele napěťové nesymetrie α_U od 0 do 9,1 %, při zachování těchto číselných hodnot ostatních obvodových parametrů.

Prvořadý význam mají hodnoty celkového účinníku usměrňovače určeného ze složek odebíraného výkonu. Z **obrázku 3** je patrné, že usměrňovač vykazuje s rostoucí nesymetrií napájecího napětí klesající hodnotu účinníku, který má trvale kapacitní charakter.

Na dalším **obrázku 4** jsou znázorněny závislosti účinníku jednotlivých fází napájecího napětí na jeho stupni nesymetrie. Jak bylo možno očekávat z časového průběhu proudu fáze (L3) na obrázku 2, má účinník fáze (L3) ve srovnání s účinníky zbývajících fází význačně kapacitní charakter. Navíc je patrné, že proud fáze (L1) má charakter induktivní.

Pro posouzení možnosti připojení usměrňovače s charakteristikami podobného typu je závažná harmonická analýza odebíraných fázových proudů. Závislost amplitud první harmonické fázových proudů na stupni nesymetrie napájecího napětí fáze (L1) je znázorněna na **obrázku 5**.

Každý šestipulzní usměrňovač je na napájecí straně generátorem především 5. a 7. harmonické. Poměrné hodnoty těchto složek jsou ve vztahu k základní harmonické znázorněny v závislosti na stupni nesymetrie napájecího napětí na **obrázku 6** a **7**. Pro průběhy na obou těchto obrázcích je zajímavé, že s rostoucím stupněm nesymetrie napájecího napětí poměrné obsahy 5. a 7. harmonické v podstatě klesají. Výjimku tvoří složka 7. harmonické proudu fáze (L1).

Hodnoty uvedené na obou obrázcích souhlasí s varovnými údaji PNE 33 3430-0 [7]. Zde článek 6.2.1.2 “Usměrňovače s kapacitní filtrací” obsahuje tabulku 8 uvádějící pro trojfázový proud a 5. harmonickou výpočetní poměrný obsah 86 %, pro 7. harmonickou pak obsah 70 %.

Celkově se zkresení časového průběhu fázových proudů posuzuje činitelem celkového zkresení THD, jehož závislost na stupni nesymetrie napájecího napětí je uvedena na **obrázku 8**. Z obrázku je patrné, že THD proudů fází (L1) a (L3) vzrůstá se stupněm nesymetrie napájecích napětí, zatím co pro THD proudu fáze (L2) dochází ze zatím neznámých důvodů k poklesu.

Posuzování EMC usměrňovače s R-C zátěží

Hodnocení vlastností statických měničů, které mají na vstupu trojfázový usměrňovač s odporově - kapacitním zatížením a stejnosměrným meziobvodem z hlediska jejich EMC vůči napájecí síti, závisí na:

- jejich schématu,
- jejich výkonu,

- způsobu jejich připojení do veřejné sítě rozvodného závodu,
- zkratovém výkonu veřejné sítě v odběrném místě,
- případném sjednání zvláštní dohody s rozvodným závodem.

Analyzovaný příklad se týká měniče s malým výkonem. Jeho vlastnosti v oblasti EMC vůči napájecí síti mají vliv na elektrické poměry v této síti, což se dotýká nejenom této sítě samé, ale v této souvislosti nutno zajistit i nerušenou dodávku elektrické energie ostatním odběratelům, zejména neodrážním spotřebičům, napájeným v daném místě z drážního rozvodu v rámci autorizace udělené Českým drahám.

Rámcově se zde uplatňuje **zákon č. 222/1994 Sb.** [5], který v § 15 článek (4) písmeno a) ukládá odběrateli zajistit, aby jeho odběrné zařízení bylo vybaveno dostupnými technickými prostředky omezujícími vliv zpětného působení na kvalitu dodávané elektřiny ostatním odběratelům a aby neovlivňovalo funkci řídicí, měřicí a zabezpečovací techniky a činnost systému hromadného dálkového ovládní. V případě porušení této povinnosti má dodavatel elektřiny ve smyslu § 9 článek (4) písmeno h) právo omezit nebo přerušit v nezbytném rozsahu dodávku energie, jestliže odběratel používá při odběru energie zařízení, které ovlivňuje kvalitu energie v neprospekch ostatních odběratelů, nebyla-li učiněna dostupná technická opatření k omezení tohoto vlivu.

Pro první hledisko, to jest zpětné působení měniče jako elektrického zařízení na napájecí síť nízkého napětí, platí následující předpisy a normy, definující podmínky pro připojení těchto zařízení:

- **PNE 33 3430-1** [8] obsahuje kapitolu 4 “Meze harmonických emitovaných instalací odběratele do sítě nn - připojovací podmínky”.
- V kapitole 4.1.1 této PNE “Připojování relativně malých zařízení” se na prvním místě analyzuje stav, kdy zkratový poměr v odběrném místě sítě, definovaný jako zkratový výkon sítě ve společném napájecím bodu S_K dělený jmenovitým zdánlivým výkonem elektrického zařízení S , není menší než 33. V takovém případě může být elektrické zařízení připojeno po posouzení dodavatelem elektrické energie (např. zda již v dané síti nejsou podobné odběry) do sítě nn, pokud emise harmonických proudů nepřekročí tyto mezní hodnoty: pro 5. harmonickou **10,7 %** a pro 7. harmonickou **7,2 %** jmenovitého proudu (viz tabulka 4 citované PNE).
- Pokud zařízení nevyhoví mezním podmínkám podle předchozího kritéria a zkratový poměr je větší než 33, pak toto zařízení může být po posouzení dodavatelem elektrické energie (např. zda již v dané síti nejsou podobné odběry) připojeno do sítě nn, pokud emise harmonických proudů nepřekročí hodnoty uvedené v následující tabulce, respektující vliv charakteristik sítě nn. Pak lze připustit větší poměrné hodnoty obsahu 5. a 7. harmonické proudu pouze za předpokladu větších hodnot zkratového výkonu sítě nn. Pro 5. a 7. harmonickou platí následující hodnoty závislé na zkratovém poměru:

zkratový poměr větší než	jednofázová zařízení THD %	I_3 %	I_5 %	I_7 %	trojfázová zařízení THD %	I_5 %	I_7 %
120	29	25	12	10	18	15	12
175	33	29	16	11	25	20	14
250	39	34	18	12	35	30	18
350	46	40	24	15	48	40	25
450	51	40	30	20	58	50	35
>600	57	40	30	20	70	60	40

Pro hodnoty zkratového poměru mezi 33 a 120 je možné provádět lineární interpolaci mezi mezními hodnotami. V případě jednofázového zařízení připojeného na fázové napětí platí mezní hodnoty podle této tabulky s tím, že zkratový poměr je $S_K/(3 \cdot S)$. Je-li jednofázové zařízení připojeno na sdružené napětí, pak je zkratový poměr dán jako $S_K/(2 \cdot S)$.

V této tabulce jsou současně uvedeny i mezní hodnoty činitele celkového zkreslení THD, kterým se souhrnně respektují harmonické též vyšších řádů.

Relativní hodnoty sudých harmonických nesmí přitom překročit hodnotu $16/n$ %.

- Jsou-li překročeny i mezní poměrné hodnoty harmonických proudů podle předchozího kritéria, může dodavatel elektrické energie požadovat filtraci harmonických, nebo nesouhlasit s připojením. V tomto případě se mezi dodavatelem a odběratelem vyžaduje zvláštní smlouva, kde se smluvní hodnoty mezi harmonických proudů stanoví **podle sjednaného příkonu instalace odběratele**. Mezní hodnoty jednotlivých harmonických musí být potom vztaženy k činnému proudu I_s odpovídajícímu sjednanému příkonu instalace odběratele. Činitel THD nesmí přitom překročit **20 %**. Jako příklad lze uvést následující mezní hodnoty poměrného obsahu **5. harmonické 9,5 % sjednané hodnoty proudu, 7. harmonické 6,5 % sjednané hodnoty proudu**. Toto kritérium je nutno posoudit přímo na konkrétním místě nasazení měniče.
- Citovaná PNE v článku 4.2 definuje požadavky na výrobce zařízení. Výrobce musí informovat zákazníka o tom, že připojení zařízení může vyžadovat souhlas dodavatele elektrické energie s připojením. V souvislosti s tím výrobce zařízení upozorní zákazníka, aby si vyžádal od dodavatele elektrické energie informace o zkratovém výkonu v místě připojení. Výrobce zařízení musí buď přímo na zařízení nebo v dokumentaci zařízení vyznačit minimální zkratový poměr, pro který zařízení vyhovuje mezním hodnotám harmonických.

Druhé hledisko sledující nárok ostatních odběratelů na dodávku čisté elektrické energie (např. v rámci jedné žst. na základě autorizace ČD) je uvedeno v *EN 50160* [1] v kapitole 2 “Charakteristiky dodávky elektrické energie nízkého napětí”, v článku 2.11 “Harmonické napětí”. Tato EN však doposud do soustavy ČSN zavedena nebyla, ve státech EÚ však platí od roku 1994. Tato EN obsahuje dva požadavky:

- Za normálních provozních podmínek musí být během každého časového úseku jednoho týdne 95 % desetiminutových průměrných efektivních hodnot každého jednotlivého harmonického napětí menší nebo rovné hodnotě dané tabulkou. Pro 5. harmonickou platí obsah nejvýše **6 % U_1** , pro 7. harmonickou nejvýše **5 % U_1** .
- Celkový činitel zkreslení (**THD**) napájecího napětí (pro harmonické do **$n = 40$**) musí být **$THD \leq 8 \%$** .

Zákon č. 22/1997 Sb. [6] v § 13 “Prohlášení o shodě” v odstavci (2) uvádí: “Výrobce nebo dovozce stanoveného výrobku je povinen před uvedením výrobku na trh vydat písemné prohlášení o shodě výrobku s technickými předpisy..... Náležitosti prohlášení o shodě stanoví vláda nařízením”.

K provádění tohoto zákona byla vydána následující **nařízení vlády**:

- **č. 168/1997** [10], kterým se stanoví technické požadavky na elektrická zařízení nízkého napětí,
- **č. 169/1997 Sb.** [11], kterým se stanoví technické požadavky na výrobky z hlediska jejich elektromagnetické kompatibility,
- **č. 173/1997 Sb.** [12], kterým se stanoví vybrané výrobky k posuzování shody.

Z těchto nařízení vlády vyplývá pro výrobce nebo dovozce povinnost vydat potvrzení mimo jiné o tom, že vlastnosti výrobku splňují základní požadavky na výrobky a že přijal opatření, kterými zabezpečuje shodu všech výrobků uváděných na trh s technickou dokumentací a se základními požadavky na výrobky. Dále výrobce nebo dovozce musí uvést seznam technických předpisů a harmonizovaných ČSN, popřípadě technických norem IEC a CEE, které byly použity při posuzování shody. Pokud nebyly použity harmonizované ČSN nebo technické normy IEC nebo CEE nebo pokud takové normy nekonkretizují všechny základní požadavky, uvedou se v dokumentaci popisy řešení přijatých pro splnění základních požadavků.

Z á v ě r y

Předkládaná simulační studie přinesla tyto částečně zobecnitelné poznatky, týkající se analyzovaného reálného obvodu trojfázového šestipulzního usměrňovače se zatěžovacím obvodem s velkou kapacitou:

- 1) Časový průběh odebíraného fázového proudu je během poloperiody napájecího napětí přerušovaný a vykazuje v každé poloperiodě vždy dva pulzy.
- 2) Při symetrickém napájecím napětí vykazuje analyzovaný obvod jako celek hodnotu celkového účinníku základní harmonické $\cos \varphi_{\text{CELK}} = 0,9936$, který však má kapacitní charakter.

- 3) Stejně kapacitní charakter mají při symetrickém napětí napájecí sítě účinníky základní harmonické i jednotlivých fází.
- 4) Při nesymetrickém napájecím napětí, daném zmenšením hodnoty napětí fáze (L1), ztrácí od jisté hodnoty napětí této fáze účinník její základní harmonické charakter kapacitní a přechází do charakteru indukčního, zatím co účinníky základní harmonické zbývajících fází (L2) a (L3) zůstávají v kapacitním charakteru.
- 5) Spektrum harmonických složek proudu jednotlivých fází je bohaté. I v případě symetrické soustavy napájecího napětí dosahuje poměrný obsah 5. harmonické cca 75 %, obsah 7. harmonické pak cca 55 % základní harmonické.
- 6) Také hodnoty činitele celkového zkreslení (THD) vykazují i v případě symetrické soustavy napájecího napětí vysokou hodnotu cca 93 %.
- 7) Vzhledem k vysokým hodnotám harmonických fázových proudů i činitele celkového zkreslení (THD) je nutno před instalací měniče analyzovaného typu posoudit splnění jednotlivých v textu uvedených kritérií.

Literatura

- [1] EN 50160 “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems”, November 1994
- [2] IEC 1000-3-4 “Elektromagnetická kompatibilita. Část 3: Meze. Oddíl 2: Meze pro emise harmonického proudu (zařízení se vstupním fázovým proudem větším než 16 A)”, připravuje se ve WG1, SC77A, IEC
- [3] ČSN IEC 1000-2-2 “Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 2: Prostředí. Oddíl 2: Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí”, Leden 1996
- [4] ČSN 33 3020 “Elektrotechnické předpisy. Výpočet poměrů při zkratech v trojfázové elektrizační soustavě”, Zář 1992
- [5] Zákon č. 222/94 Sb. z 2. 11. 1994 o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o státní energetické inspekci
- [6] Zákon č. 22/97 Sb. z 24. 1. 1997 o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů
- [7] PNE 33 3430-0 “Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů distribučních soustav”, platná od 15.5.1998
- [8] PNE 33 3430-1 “Parametry kvality elektrické energie. Část 1: Harmonické”, platná od 1. 4. 1999
- [9] PNE 33 3430-3 “Parametry kvality elektrické energie. Část 3: Nesymetrie napětí”, návrh
- [10] Nařízení vlády č. 168/1997 Sb. z 25. června 1997, kterým se stanoví technické požadavky na elektrická zařízení nízkého napětí
- [11] Nařízení vlády č. 169/1997 Sb. z 25. června 1997, kterým se stanoví technické požadavky na výrobky z hlediska jejich elektromagnetické kompatibility
- [12] Nařízení vlády č. 173/1997 Sb. ze dne 25. června 1997, kterým se stanoví vybrané výrobky k posuzování shody

V Praze, červen 1999

Lektoroval: Ing. Jan Matějka
 ČD DDC 014