

Ochrana před úrazem elektrickým proudem při použití proudových chráničů v obvodech s měniči frekvence

Dr inž. Stanisław Czapp, Politechnika Gdanska

Pro obvody s měniči frekvence je charakteristické, že tvar zkratového proudu při zem. spojení závisí na místě zkratu. Zkratové proudy při zemním spojení tak mohou mít různou frekvenci a být silně deformované. Mohou ale být také stejnosměrné s malým nebo velkým zvlněním, v závislosti na použité soustavě usměrňovačů. Tvar a frekvence proudu značně ovlivňují správné fungování proudových chráničů. V některých případech nemusí ochrana zafungovat, přestože existuje riziko úrazu elektrickým proudem. Obvod měniče frekvence je rovněž charakterizován značnými svodovými proudy při zapínání a ve stabilizovaném stavu. To může způsobovat zbytečné vybavování proudových chráničů a nežádoucí přerušování dodávek energie.

V článku jsou prezentovány výsledky výzkumů funkce proudových chráničů při proudech s různou frekvencí a průběhem svodových proudu v obvodech s měniči frekvence. Jsou zde uvedeny i pokyny týkající se používání proudových chráničů v těchto obvodech využitelné v praxi.

V současné době je možné pozorovat používání měničů frekvence ve stále větší šíři oborů. Objevují se v průmyslu, ale i v domácnostech. Využívají se především pro regulaci rychlosti otáček elektromotorů. V obvodech, jejichž součástí jsou měniče frekvence, je třeba věnovat zvláštní pozornost výběru a účinnosti prostředků dodatečné ochrany proti úrazu elektrickým proudem.

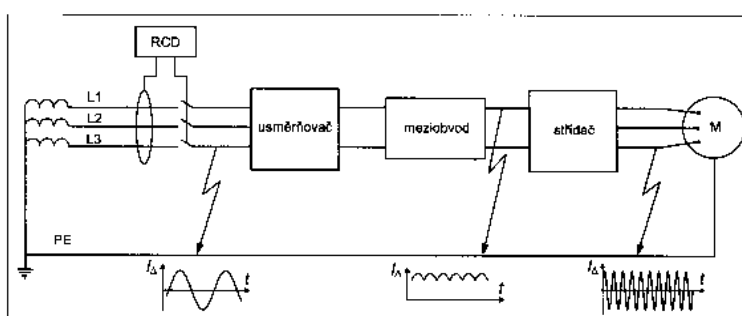
Nejčastěji používaným prostředkem dodatečné ochrany proti úrazu elektrickým proudem (ochrana při nepřímém dotyku) v nízkonapětových instalacích je samočinné odpojení zařízení od zdroje při zkratu se zemí. Vypnutí napájení zajišťují nadproudové jističe, pojistky nebo proudové chrániče [6]. Velmi často se volí proudové chrániče. Reagují na zemní proudy s hodnotami značně nižšími než hodnoty, na něž reagují nadproudová zabezpečení. Používání proudových chráničů je v některých instalacích dokonce povinné [7].

Při zemním zkratu v obvodu měniče frekvence je třeba počítat s proudem různého tvaru a různé frekvence (obr. 1), v závislosti na místě zkratu a vyladění převodníku; to podstatně ovlivňuje správnost fungování proudových chráničů. Frekvenční rozsah všeobecně používaných proudových chráničů se může nacházet v rozmezích 0 až 50 Hz,

0 až 120 Hz, 0 až 200 Hz, 0 až 400 Hz, 0 až 650 Hz, 0 až 1 000 Hz, 50 až 120 Hz, 50 až 400 Hz, 50 až 1 000 Hz. Frekvence rozdílového proudu se může pohybovat v již uvedených rozmezích a také může obsahovat její harmonické. Proud způsobující vybavení

ní. Hodnota celkového svodového proudu je o dost vyšší než proud v ochranném vodiči.

S ohledem na tvar rozdílového proudu, při němž je zaručeno vybavení proudového chrániče, se tato zařízení dělí do tří skupin (tab. 1).



Obr. 1. Zjednodušené schéma obvodu s měničem frekvence s možným průběhem proudu při zemním zkratu; RCD – proudový chránič

ní proudového chrániče může velmi kolísat v závislosti na změnách frekvence proudu.

Při instalaci proudových chráničů v obvodech s měniči frekvence je třeba věnovat pozornost značným ustáleným svodovým proudům, které mohou způsobovat zbytečné vybavení chráničů. Značná část proudu je sváděna do země prostřednictvím konstrukce zaříze-

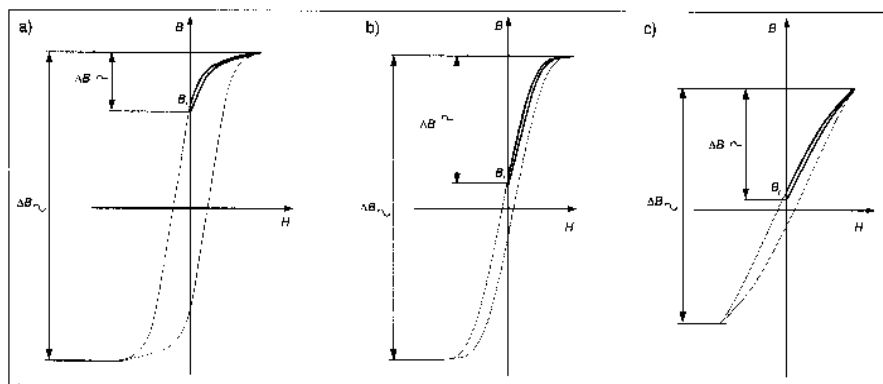
Nejčastěji se používají proudové chrániče typu AC, jelikož jsou nejlevnější. Méně často se lze setkat s chrániči typu A. Chrániče typu B se s ohledem na jejich velmi vysokou cenu v poměru ke dvěma zbývajícím typům instalují jen sporadicky. Chrániče typu AC a A se často bez rozmyslu používají v obvodech, v nichž se může tvar rozdílového prou-

Tab. 1. Rozdělení proudových chráničů podle citlivosti na tvar rozdílového proudu [4]

Označení proudového chrániče	Soustava způsobující vybavení chrániče reaguje na rozdílový proud:
AC	sinusové střídavý
A	sinusové střídavý a stejnosměrný pulsní se složkou nepřesahující 6 mA
B	sinusové střídavý, stejnosměrný pulsní a stejnosměrný s malým zvlněním

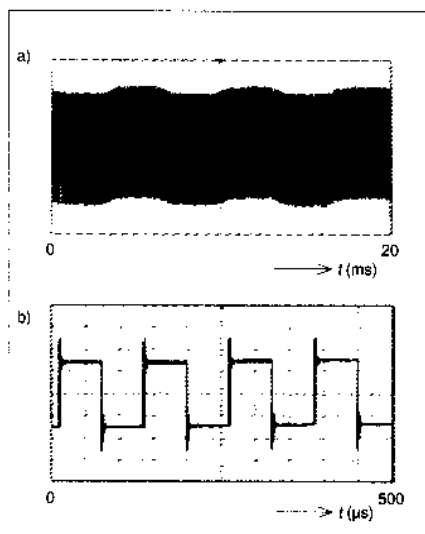
Tab. 2. Vybrané příklady soustav usměrňovačů, průběhy proudů zemních zkratů i_{Δ} [3]

Schéma obvodu	Druh proudu i_{Δ}	Tvar proudu i_{Δ}
	pulsující jednocestně usměrňovaný	
	pulsující jednocestně usměrňovaný s vyhlazovacím filtrem	
	stejnosemnný s malým obsahem periodické složky	



Obr. 2. Charakteristické průběhy hysterezní smyčky
a) zakulacená, b), c) plochá; plná čára – přibližný rozsah změn magnetické indukce v jádru rozdílového transformátoru vyvolaných půlvlnným rozdílovým proudem

du měnit. Z výsledků výzkumu vyplývá, že vliv frekvence na vybavovací proud proudových chráničů typu AC a A může být velký. Za jistých podmínek tedy tyto chrániče zajistí účinnou dodatečnou ochranu proti úrazu elektrickým proudem, jindy však při jejich použití nelze takto účinné ochrany dosáhnout.



Obr. 3. Napětí proti zemi na výstupu převodníku [8]

Vliv tvaru proudu na funkci chráničů typu AC a A

Zkrat se zemí ve „zprostředkovacím“ obvodu stejnosměrného proudu

Při zkratu se zemí je průběh rozdílového proudu na výstupu usměrňovače stejnosměrný a v závislosti na tom, zda byl nebo nebyl použit vyhlazovací filtr, může být charakterizován větším nebo menším zvlněním. V průmyslových měničích frekvence se používají vícepulsní usměrňovače. V takovém případě je pro zkratový proud charakteristické malé zvlnění. V tab. 2 jsou uvedeny vybrané soustavy usměrňovačů a možný tvar proudu zemního zkratu.

Proudový chránič vybaví tehdy, když se v sekundárním obvodu Ferrantiho transformátoru v důsledku procházejícího rozdílového proudu objeví dostatečně velká elek-

trická síla. Indukovaná elektromotorická síla závisí na změnách indukce v jádru transformátoru.

Na obr. 2 jsou znázorněny změny indukce v jádru rozdílového transformátoru při rozdílovém půlvlnném proudu v závislosti na použitém magnetickém materiálu. V případě hysterezní smyčky znázorněné na obr. 4a je změna indukce při půlvlnném průběhu příliš malá na to, aby chránič vybavil. Je nutné použít magnetický materiál, který je charakterizován malou remanentní indukcí B_r (obr. 2b a obr. 2c), tak, aby změny indukce při jednosměrných průbězích byly poměrně velké. V obvodech, v nichž se mohou objevit jednosměrné průběhy s velkým zvlněním, je tedy třeba používat proudové chrániče typu A uzpůsobené k vybavování při takovémto rozdílovém proudu. Chrániče typu AC nejsou uzpůsobeny pro vybavování při jednosměrných prouděch.

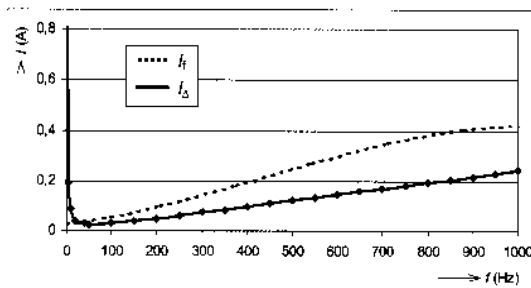
Prochází-li meziobvodem usměrněný proud z vícepulsního usměrňovače nebo používá-li s vyhlazovací filtr, způsobuje jak malé zvlnění rozdílového proudu, tak malé změny indukce, že dokonce ani proudové chrániče typu A nebudou správně fungovat. Má-li se ochrana proti úrazu elektrickým proudem i nadále zakládat na proudových chráničích, je třeba používat velmi nákladné proudové chrániče typu B uzpůsobené k vybavování při vyhlazených jednosměrných prouděch [2].

Vliv frekvence a harmonických

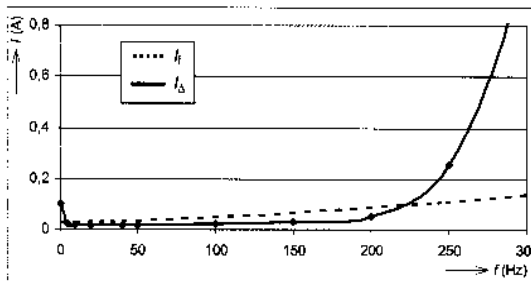
Zkratový proud může mít ve výstupním obvodu převodníku různou frekvenci a zpravidla je charakterizován značným obsahem harmonických. Na obr. 3 je

znázorněno napětí proti zemi na výstupu převodníku. Při zemním zkratu bude spektrum proudu podobné.

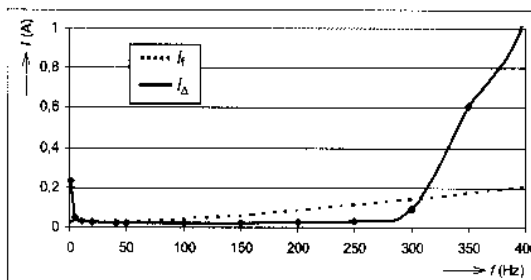
Vliv frekvence na vybavovací proud byl zkoumán u více než dvaceti proudových chráničů. Byly mezi nimi chrániče typu AC a A, bez zpoždění, se zpožděným vybavením a selektivní, dvoupólové a čtyřpólové. Zkoumány byly chrániče se jmenovitými vybavovacími proudy $I_{\Delta n} = 30, 100, 300$ a 500 mA. Vybrané výsledky výzkumu jsou znázorněny na obr. 4 až obr. 7. Na každém obrázku je přerušovaná čára označená symbolem I_f , která odpovídá křivce stanovující práh fibrilace ve funkci frekvence [5]. Je to hodnota proudu, která ještě nezpůsobí vážné následky, pro-



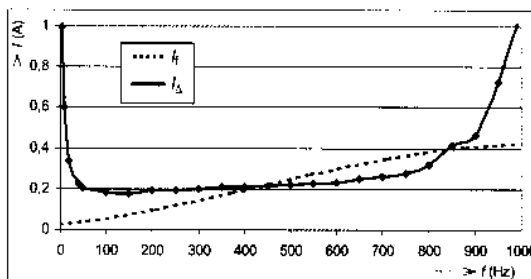
Obr. 4. Vybavovací proud proudového chrániče s parametry $I_{\Delta n} = 30$ mA, typ AC se zpožděným vybavením



Obr. 5. Vybavovací proud proudového chrániče s parametry $I_{\Delta n} = 30$ mA, typ AC



Obr. 6. Vybavovací proud proudového chrániče s parametry $I_{\Delta n} = 30$ mA, typ A



Obr. 7. Vybavovací proud proudového chrániče s parametry $I_{\Delta n} = 300$ mA, typ A

jde-li organismem člověka. Plná čára označená I_{Δ} znázorňuje skutečný vybavovací proud daného proudového chrániče.

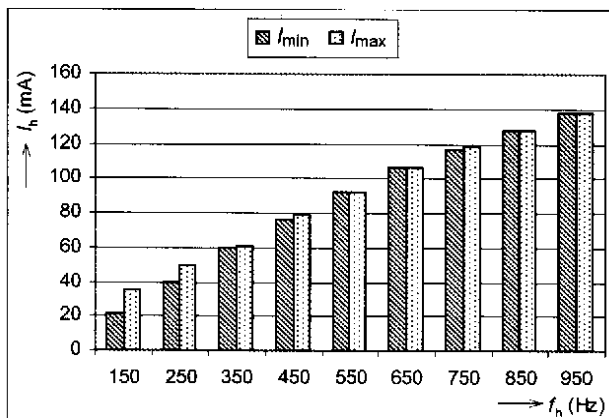
Na obr. 4 je charakteristika frekvence proudového chrániče typu AC s $I_{\Delta n} = 30$ mA. Lze si zde všimnout výrazného vlivu frekvence na vybavovací proud. Tento chránič při frekvenci 50 Hz vybavil při proudu o něco větším než 20 mA. Při frekvenci 1 Hz ale chránič vybavil teprve při proudu větším než 2 A. S rostoucí frekvencí se vybavovací proud tohoto chrániče zvětšuje a pro frekvenci 1 000 Hz je jeho hodnota 242 mA; stále se však nachází pod čarou označující práh fibrilace.

Větší citlivost na zvyšování frekvence proudu se projevila u proudového chrániče, jehož frekvenční charakteristika je znázorněna na obr. 5. Z průběhu vyznačeného plnou čarou vyplývá, že vybavovací proudy se nacházejí pod čarou I_f při rozsahu frekvencí od 50 do 200 Hz. Při snižování frekvence pod 50 Hz se však podobně jako v případě většiny chráničů vybavovací proud značně zvětšuje. Podobně je tomu u frekvencí nad 200 Hz – vybavovací proud zde rychle roste a při frekvenci nad 350 Hz už chránič nereaguje ani na proudy o velikosti několika ampérů.

Výsledky výzkumu proudových chráničů znázorněné na obr. 6 ukazují, že tento chránič, podobně jako chránič s charakteristikou uvedenou na obr. 5, v zásadě reaguje na proudy s nízkou frekvencí (do 450 Hz). Při vyšších hodnotách frekvence však nevybaví dokonce ani při proudech o hodnotě několika ampérů. Charakteristika uvedená na obr. 9 ukazuje, že se vybavovací proudy chrániče 300 mA při frekvencích nad 500 Hz nacházejí pod čarou označující práh fibrilace. To znamená, že tento chránič v rozsahu frekvencí 500 až 850 Hz reaguje při proudech menších než proudy vyvolávající fibrilaci, tj. je stejně účinný jako proudový chránič s $I_{\Delta n} = 30$ mA při frekvenci 50 Hz.

Výsledky výzkumu působení harmonických ukázaly, že tyto velmi ovlivňují citlivost proudových chráničů. Předmětem zkoumání byl vliv fázového posunu a řádu harmonické. Při harmonických poměrně nízkého řádu, např. 3. nebo 5., byla citlivost chráničů podobná jako pro 50 Hz, avšak pro harmonické 9., 11. řádu a vyšší značně klesala.

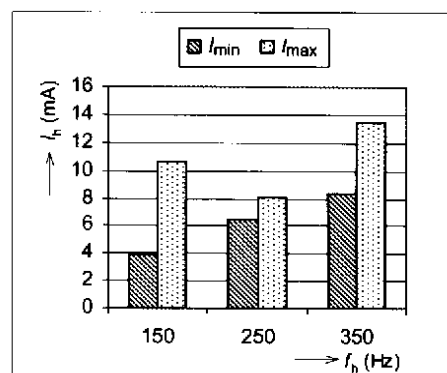
Na obr. 8 jsou znázorněny výsledky zkoumání funkce vybraného proudového chrániče s $I_{\Delta n} = 100$ mA při proudu s účastí harmonických. Při sinusově střídavém proudu o frekvenci 50 Hz tento chránič vybaví po dosažení proudu o hodnotě 70 mA. Při výzkumu byla účinná hodnota základní harmonické stano-



Obr. 8. Účast harmonických v rozdílovém proudu způsobujícím vybavení proudového chrániče 100 mA typu AC, se zpožděným vybavením; účinná hodnota 1. harmonické 60 mA, f_h – frekvence harmonické

vena na úrovni 60 mA, přičemž byl zvyšován podíl jedné z harmonických až do okamžiku vybavení chrániče.

Proud I_{min} označuje nejnižší účinnou hodnotu proudu harmonické, jejíž účast způsobila vybavení chrániče při nejvýhodnějším fázovém posunu rozdílového proudu. Proud I_{max} označuje nejvyšší účinnou hodnotu proudu harmonické, jejíž účast způsobila vybavení chrániče při nejméně výhodném fázovém posunu rozdílového proudu. Je zcela zřejmé, že pro liché harmonické do 5. řádu je fázový posun harmonické významný. Pro ostatní harmonické není fázový posun důležitý, podstatný význam má však řád harmonické. Při 19. harmonické chránič vybavil teprve při



Obr. 9. Účast harmonických v rozdílovém proudu způsobujícím vybavení proudového chrániče 30 mA typu AC; účinná hodnota 1. harmonické 20 mA, f_h – frekvence harmonické

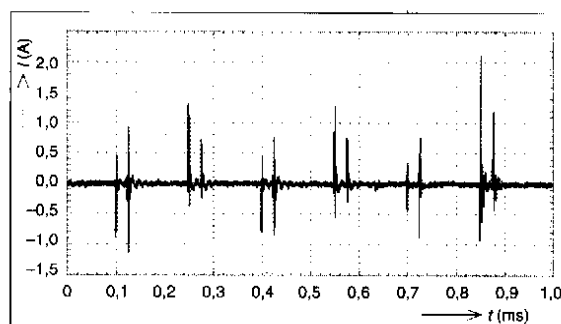
její více než dvojnásobné účasti (140 mA) v poměru k základní harmonické.

Na obr. 9 jsou znázorněny výsledky obdobného výzkumu proudového chrániče $I_{\Delta n} = 30$ mA, jehož skutečný vybavovací proud pro základní harmonickou je 23 mA. Tento chránič vybaví jen tehdy, jsou-li v rozdílovém proudu přítomny harmonické poměrně nízkého řádu.

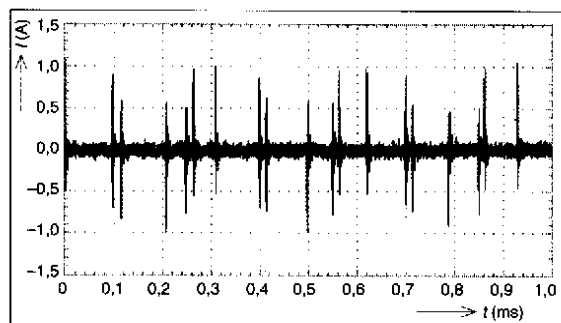
Tento chránič nereagoval na rozdílový proud, který byl charakterizován dokonce pětinasobně vyšší účastí 9. harmonické oproti základní. Pro jeho vybavení při takové účasti 9. harmonické bylo třeba dvojnásobně zvýšit základní harmonickou. Vynucování harmonických stále vyššího řádu vedlo k dalšímu zvyšování hodnoty základní harmonické. To znamená, že chránič ztrácí své zabezpečovací vlastnosti dokonce pro základní harmonickou, jestliže jsou kromě ní ve značné míře přítomny harmonické.

Vliv svodových proudů

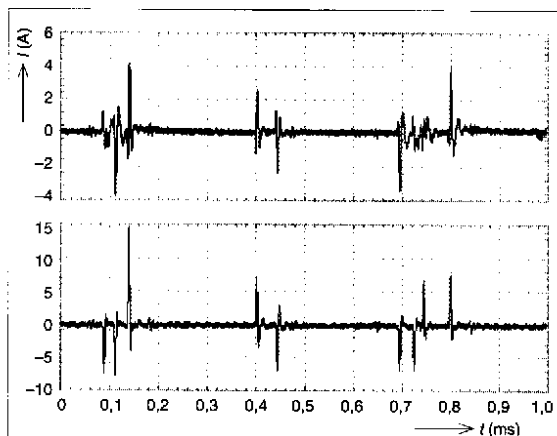
V obvodu měniče frekvence se vyskytují velké svodové proudy. Jsou způsobeny použitím vstupního a výstupního filtru měniče frekvence a parazitními kapacitami. Zdrojem svodového proudu je také výstupní obvod, tj. vodič, obzvláště stíněný, a zemní kapacity vinutí napájeného motoru. Hodnoty svodových proudů mohou dosahovat několika miliampérů, dokonce i několika ampérů. Aby proudový chránič na svodové proudy nereagoval, měl by jeho nominální rozdílový proud být dvojnásobně až trojnásobně větší než celkový svodový proud. Charakteristika proudových chráničů se uvádí pro frekvenci 50/60 Hz, svodový proud může mít spektrum od nuly do několika desítek kilohertzů; to znesnadňuje správný výběr zařízení.



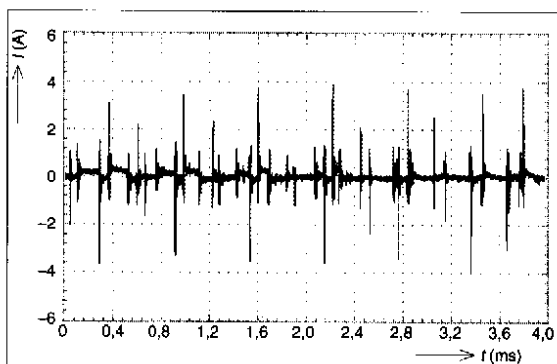
Obr. 10. Průběh proudu v ochranném vodiči obvodu s měničem frekvence a motorem o výkonu 11 kW; ustálený průběh, bez zátěže, rychlost otáček 20 % n_s , špičková hodnota proudu $I_{max} = 2,2$ A



Obr. 11. Průběh proudu v ochranném vodiči obvodu s měničem frekvence a motorem o výkonu 11 kW; ustálený průběh, zátěž motoru asi 40 %, rychlost otáček 90 % n_s ; špičková hodnota proudu $I_{max} = 1$ A



Obr. 12. Průběh proudu v ochranném vodiči (horní průběh) a rozdílového proudu (geometrický součet $L1$, $L2$, $L3$, N – spodní průběh) v obvodech s měničem frekvence; zátěž $4 \times 3 \text{ kW}$, frekvence 50 Hz



Obr. 13. Průběh proudu v ochranném vodiči v obvodu s měničem frekvence; zátěž $4 \times 3 \text{ kW}$, frekvence 40 Hz , špičková hodnota proudu $I_{\max} = 4 \text{ A}$

Proud procházející ochranným vodičem byl zkoumán v obvodu měniče frekvence a motoru o výkonu 11 kW (obr. 10 a obr. 11) a v obvodu měniče frekvence a čtyř motorů o výkonu 3 kW (obr. 12 a obr. 13). Proud v ochranném vodiči spojujícím měnič jak se sítí, tak s motorem je pulsní povahy a je výsledkem přepínání tranzistorových spínačů. V okamžiku přepínání klíče se objevuje velká strmost napětí du/dt , což přispívá k procházení proudu přes kapacitu izolace.

Na obr. 12 je uveden průběh proudu v ochranném vodiči a průběh rozdílového proudu měřeného jako geometrický součet proudů ve fázových vodičích a v nulovém

vodiči ($L1$, $L2$, $L3$, N) v obvodu s měničem a čtyřmi motory o výkonu 3 kW . Je zde zřetelný rozdíl v hodnotách proudu, který prochází ochranným vodičem, a rozdílového proudu. Velká část proudu je sváděna do země prostřednictvím konstrukce zařízení. Hodnota celkového svodového proudu je značně vyšší než proud v ochranném vodiči. Měření proudu v ochranném vodiči by mohlo poskytnout chybné výsledky a zdánlivě správně zvolený proudový chránič by mohl vybavovat zbytečně. Z obr. 13 je zřejmý průběh proudu v ochranném vodiči ve stejném obvodu, ale s frekvencí napětí napájecího skupinu motorů 40 Hz . Špičkové hodnoty proudu v ochranném vodiči z obr. 12 a obr. 13 jsou srovnatelné, přestože se frekvence napětí napájecího motor liší.

Proudové chrániče s $I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$ mohou být používány v obvodech s měniči frekvence s malým výkonem řádu několika kilowattů. V obvodech s průmyslovými měniči frekvence s velkým výkonem přicházejí v úvahu chrániče 300 a 500 mA , a dokonce 1000 mA , spíše typu B.

Nejnovější konstrukce proudových chráničů typu B, určených speciálně pro obvody s měniči frekvence, využívají skutečnost, že hodnota úrazového proudu způsobujícího fibrilaci se mění spolu s frekvencí. To dovolu- je snížit citlivost chrániče při vyšších frekvencích na 300 mA , přičemž účinnost je stejná jako u chrániče 30 mA při frekvenci 50 Hz . Charakteristika takového chrániče je uvedena na obr. 14a.

Pro obvody, v nichž se mohou vyskytovat velké svodové proudy s obsahem harmonických dělitelných třemi (150 , 450 , 750 Hz), jsou vhodné proudové chrániče se sníženou citlivostí na proudy tohoto typu (obr. 14b). Z charakteristiky na obr. 14b vyplývá, že při frekvenci v rozsahu 0 až 100 Hz a nad 1000 Hz je citlivost tohoto chrániče 300 mA ,

kdežto při rozsahu frekvencí 100 až 1000 Hz je jeho citlivost cíleně snížena. Lze také stanovit, zda bude daný chránič správně fungovat při silně deformovaném zkratovém proudu při zemním spojení. Aby se předešlo zbytečnému vybavování při zapínání obvodu, je třeba používat chrániče se zpožděným vybavováním, nebo dokonce chrániče selektivního typu.

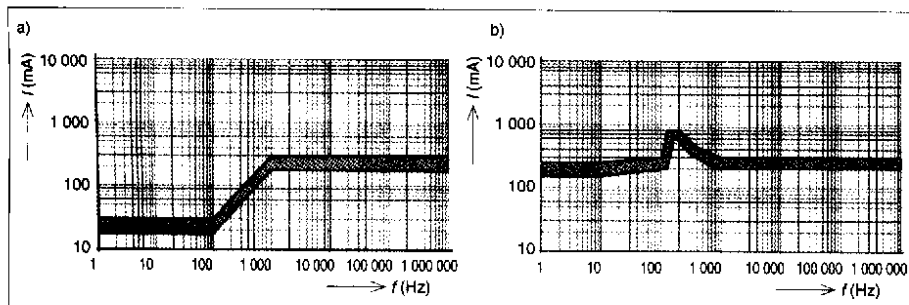
Závěr

V obvodech s měniči frekvence mohou mít zkratové proudy při zemním spojení různou frekvenci a mohou být silně deformované, ale mohou být také stejnosměrné s malým nebo velkým zvlněním, v závislosti na použité soustavě usměrňovačů. Tvar a frekvence proudu velmi ovlivňují správné fungování proudových chráničů. V některých případech ochrana nemusí vybavit, přestože existuje riziko úrazu elektrickým proudem. Obvod měniče frekvence je charakterizován také značnými svodovými proudy při zapínání a ve stabilizovaném stavu. To může způsobovat chybnou funkci proudových chráničů a nežádoucí přerušování dodávek energie. Při volbě proudových chráničů pro obvody s měniči frekvence je třeba zohlednit specifika daného měniče frekvence související s možnými tvary zkratového proudu. V některých případech mohou být dostačující chrániče typu A, avšak pro průmyslové měniče frekvence s velkým výkonem je třeba používat spíše nákladné chrániče typu B.

Badatelská činnost související se zmíněnou problematikou je hrazena z prostředků na rozvoj vědeckých projektů poskytnutých Ministerstvem vědy Polské republiky pro období 2005 až 2008 .

Literatura:

- [1] CZAPP, S.: *Application of residual current devices in electrical installations with frequency converters*. The Scientific Papers of Faculty of Electrical and Control Engineering Gdansk University of Technology, No. 21. Gdansk, 2005.
- [2] Doepeke – Katalog. *Ochrana lidí i zabezpečenie obwodów elektrycznych*.
- [3] EN 50178 *Electronic equipment for use in power installations*.
- [4] EN 61008-1 *Residual current operated circuit-breakers without integral overcurrent protection for household and similar uses (RCCB's) – Part 1: General rules*.
- [5] IEC Technical Report 479-1:1994 *Effects of current on human beings and livestock*.
- [6] IEC 60364-4-41 *Electrical installations of buildings. Protection for safety. Protection against electric shock*.
- [7] IEC 60364-7xx *Electrical installations of buildings. Requirements for special installation or locations*.
- [8] SCHENKE, G. – DUNZ, T. – SCHÜLER, U. – SCHMIDT, M. – GRÜNEBAST, G.: *Personenschutz in Netzen mit Frequenzumrichter*. Etz, S2/2004.



Obr. 14. Funkční charakteristiky proudových chráničů typu B ve funkci frekvence rozdílového proudu a) 30 mA , b) 300 mA se sníženou citlivostí v rozsahu frekvence 100 až 1000 Hz [3]