

TLUMIVKY V SILNOPROUDÉ ELEKTROTECHNICE – ČÁST 2

ČASTO POUŽÍVANÉ APLIKACE TLUMIVEK V SILNOPROUDÉ ELEKTROTECHNICE

Ing. Vítězslav Pankrác, CSc.
Katedra elektromagnetického pole
České vysoké učení technické v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6
Email: pankrac@fel.cvut.cz

Článek popisuje základní často používané aplikace tlumivek v silnoprůdové elektrotechnice podle jejich rozčlenění v ČSN EN 60289 - Tlumivky

1. ÚVOD

V návaznosti na první část článku [20], která pojednává o konstrukčním uspořádání tlumivek v silnoprůdové elektrotechnice, je cílem této části popsat základní často používané aplikace pro jednotlivé konstrukční typy tlumivek. Další návazné části budou věnovány otázkám konkrétní problematiky návrhu tlumivek.

Tlumivky pro silnoprůdové aplikace se často člení do dvou základních skupin. Kritériem pro toto členění je způsob zapojení tlumivek do systému. V první skupině jsou tlumivky určené pro sériové připojení (Series-connected Reactors) a ve druhé tlumivky určené pro paralelní připojení (Shunt Reactors). Toto logické členění se odráží nejen v názvech používaných výrobcí tlumivek, ale používá se i v technické literatuře, v technických normách a doporučeních [1],[2], [3], [4], [5].

Nejčastěji používanou aplikací sériových tlumivek je omezení velikosti a strmosti nárůstu elektrického proudu. Tlumivky tohoto typu omezují proudy způsobené zkraty v sítích a jiných zařízeních silnoprůdové elektrotechniky, zapínací proudy velkých elektromotorů, proudy při sepnutí kondenzátorových baterií, proudy vyvolané komutacemi polovodičových součástek. Sériové tlumivky mohou být použity také pro vyrovnání nestejné reaktance různých prvků systému (například dvou paralelních generátorů, transformátorů). Přiřazováním tlumivek je možno v přenosové a distribuční soustavě regulovat toky výkonů. Ve stejnosměrných obvodech mohou sériové tlumivky přispět k potlačení zvlnění proudu a mohou eliminovat proudové špičky. Společně s kondenzátory mohou sériové tlumivky tvořit LC filtry pro nejrůznější aplikace.

Paralelně připojené tlumivky slouží obvykle jako zdroj induktivního jalového výkonu. V soustavě pro přenos elektrické energie jsou důležitým prvkem, který napomáhá udržet stabilitu soustavy. V přenosových soustavách i v ostatních zařízeních silnoprůdové

elektrotechniky tyto tlumivky přispívají k jejich efektivnímu využití.

Z hlediska konstrukčního uspořádání se tlumivky obvykle dále člení na následující skupiny. Podle použitého chladícího a izolačního média na tlumivky v suchém provedení (dry-type) a tlumivky s olejovou náplní (oil immersed). Podle typu magnetického obvodu na vzduchové tlumivky bez feromagnetického obvodu (air-core reactors) a tlumivky s feromagnetickým obvodem (iron-core reactors). Podle prostředí, pro které je tlumivka určena, na venkovní (outdoor) a vnitřní provedení (indoor).

Následující text je zaměřen především na tlumivky s výkony přesahujícími 500kVAr. Toto výkonové členění se objevuje i v normách [2], [3], [4].

V řídicích a výkonových částech malých elektropohonů i jiných zařízení výkonové elektroniky se rovněž velice často používají sériové i paralelní tlumivky. Jedná se však většinou o podstatně nižší výkony v řádu desítek kVAr a tedy i o menší geometrické rozměry tlumivek. Tlumivky tohoto typu jsou často zabudovány do kovových skříní společně s dalšími prvky zařízení. Aby nedošlo k nežádoucí interakci s magnetickým polem tlumivek, konstruují se tlumivky těchto aplikací převážně s feromagnetickým obvodem [20]. Příkladem takové aplikace je tlumivka filtračně kompenzačního zařízení malého výkonu [30], která je zabudována do společné skříně s výkonovými kondenzátory (Obr.1, převzato z [30]). Konstrukční uspořádání tlumivek malého výkonu je velice rozmanité a není předmětem tohoto článku.



Obr.1) Filtračně kompenzační zařízení Sidac / Siemens [30] se zabudovanou tlumivkou

Základní typy konstrukčního uspořádání tlumivek [20] se postupným technickým vývojem zásadně nezměnily. Stále se jedná o cívky, které jsou umístěny buď na feromagnetickém obvodu nebo ve vzduchu. Podstatně se však mění vlastnosti použitých materiálů a jejich technologické zpracování. Používají se materiály s lepšími izolačními a tepelnými vlastnostmi, které dokonale odolávají klimatickým vlivům. Souběžně s vývojem materiálů se mění i použití jednotlivých konstrukčních typů tlumivek pro konkrétní skupiny aplikací, což lze dokumentovat na příkladu vzduchové tlumivky v sériovém zapojení. V této aplikaci se vzduchové tlumivky pro svoji lineární magnetizační charakteristiku používaly od samých počátků. V minulosti však byla jejich použitelnost omezena na nižší napěťové hladiny a vnitřní prostředí. Pro vyšší napěťové hladiny a venkovní prostředí se používaly převážně olejové tlumivky se stínícím feromagnetickým pláštěm. V současné době se vyrábějí sériové tlumivky standardně jako vzduchové pro vnitřní i venkovní prostředí ve všech napěťových hladinách. Norma IEEE C57.16 [3] již jiný druh provedení pro tyto aplikace nepředpokládá.

Kompenzační tlumivky (viz kap.2) , které jsou určeny pro paralelní připojení do systému, se běžně vyrábějí jak ve vzduchovém provedení, tak i s feromagnetickým obvodem. Pro aplikace s hladinou napětí do 121kV se používají převážně vzduchové tlumivky a jsou v současné době nabízeny až do celkového trojfázového výkonu 100MVar. Pro vyšší napěťové a výkonové hladiny se používají tlumivky v olejovém provedení s cívkami na feromagnetickém obvodu.

Základní požadavky kladené na jmenovité hodnoty tlumivek, izolační hladiny, předepsané zkoušky, povolené tolerance, jsou stanoveny normou ČSN EN 60289 (Tlumivky). Tato norma je převzata z mezinárodní normy IEC 289 (Reactors) a nahradila dříve platnou normu ČSN 351200 (Tlumivky). Normy s obdobnou problematikou jsou i IEEE C 57.16 [3] a IEEE C 57.21.[2], které jsou základem pro normy ANSI.

Norma ČSN EN 60289 člení tlumivky z hlediska aplikací na tyto základní skupiny :

- Kompenzační tlumivky
- Tlumivky pro omezení proudu
- Tlumivky uzemňující nulový vodič
- Tlumivky tlumící
- Filtrační tlumivky
- Uzemňovací transformátory
- Zhášecí tlumivky
- Vyhlažovací tlumivky

Uvedené členění je použito v následujícím textu jako osnova pro popis aplikací a funkce jednotlivých druhů tlumivek.

2. KOMPENZAČNÍ TLUMIVKY

Kompenzační tlumivky (Shunt Reactors) jsou prvky, které produkují induktivní jalový výkon potřebný ke kompenzaci nadbytečného kapacitního výkonu.

Většina zařízení, která jsou připojena na střídavou elektrickou síť, má charakter obecné impedance a zatěžuje síť současně činným i jalovým výkonem. Jedná se buď o parazitní (nežádoucí) vlastnost určitého zařízení, nebo toto zařízení jalový výkon pro svoji činnost potřebuje. Tak je tomu například v případě jalového výkonu potřebného pro vybuzení magnetického pole v transformátorech a elektromotorech. V celkové bilanci jalového výkonu se mohou podstatně uplatnit rovněž vlastnosti samotného vedení - podélné indukčnosti a příčné kapacity. Jalový výkon, který bezprostředně práci nekoná a který je nutno po vedení přenášet, způsobuje na vedení ztráty a oteplení stejně jako činný výkon. Způsobuje i úbytky napětí, které mohou znesnadňovat regulaci napětí na vedení.

Stavu s nulovým jalovým výkonem není možné obvykle trvale bezezbytku dosáhnout, lze se k němu pouze přiblížit kompenzováním kapacitního jalového výkonu pomocí přiřazených induktorů a induktivního jalového výkonu pomocí přiřazených kapacitorů. Jalový výkon se potom vyměňuje pouze mezi body, ve kterých jsou umístěny tyto reaktanční prvky, a nezatěžuje celou síť.

2.1. KOMPENZAČNÍ TLUMIVKY V SÍTÍCH VVN

Kompenzační tlumivky tohoto typu mají za úkol kompenzovat nadbytečný kapacitní jalový výkon v sítích vvn a zvn. To se týká především venkovních vedení pro napětí 220kV a 400kV, ale i kabelových vysokonapěťových vedení.

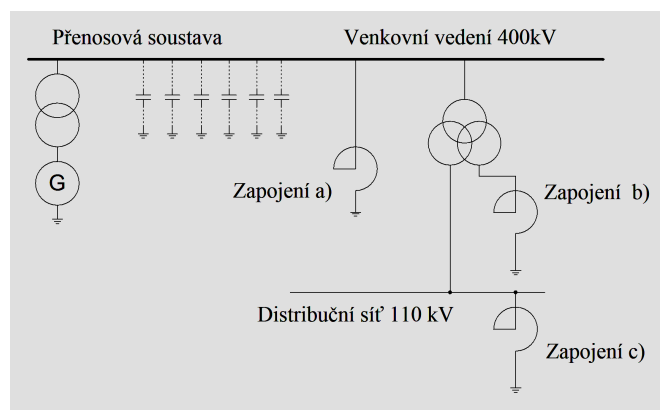
Kapacitní výkon v síti je důsledkem kapacitního charakteru samotného vedení, je dán vzájemnými kapacitami mezi fázovými vodiči a kapacitami proti zemi. Zátěž, která je na vedení připojena v jednotlivých bodech, je obvykle převážně činná nebo induktivní. Množství výsledného jalového výkonu v síti je závislé na provozním

stavu vedení. U slabě zatížených vedení v celkové bilanci převažuje kapacitní složka nad induktivní, u více zatíženého je tomu naopak.

Provoz sítě s kapacitním charakterem je doprovázen celou řadou negativních jevů. Podél vedení může kolísat napětí a v různých místech se může objevit i v ustáleném stavu větší napětí, než na jeho začátku. To znesnadňuje regulaci napětí i regulaci toku výkonu v síti a negativně ovlivňuje celkovou stabilitu. Zvýšení napětí na konci vedení se označuje jako Ferrantioho jev a je možné jej jednoduše vysvětlit tím, že se místo kladných úbytků napětí na činných a induktivních prvcích vedení objeví v síti kladné přírůstky napětí na kapacitorech. Tyto vlivy se mohou ještě umocnit různými přechodnými jevy, které vznikají často při připojování či odpojování vedení nebo při skokových změnách zátěže [7], [11]. V sítích se mohou objevit značná přepětí průmyslového kmitočtu i přepětí o vyšších kmitočtech, která mohou překročit izolační pevnost jednotlivých prvků v síti a způsobit jejich havárii. Při přechodném přesycování magnetického obvodu transformátoru může dojít k takzvané ferorezonanci, kdy se dostávají do rezonance kapacitní prvky vedení s magnetizační reaktancí transformátoru [10]. Tento jev je také doprovázen vznikem značného přepětí.

Kompenzační tlumivky v přenosových a distribučních sítích jsou vesměs třífázové. K síti jsou připojeny většinou v objektech rozvojen a transformoven. Tlumivku je možno připojit k síti přímo, nebo je možno využít terciárního vinutí velkých síťových transformátorů a autotransformátorů (Obr.2). Použité řešení je obvykle dáno nejen technickými podmínkami, ale i místními zvyklostmi. Velikost a typ tlumivky je dán velikostí potřebného induktivního jalového výkonu.

V našich podmínkách je soustava 400kV i 110 kV provozována stakzvaně účinně (přímo) uzemněným nulovým bodem. Autotransformátory mají vstupní a výstupní vinutí zapojené do společné hvězdy a samostatné terciární vyrovnávací vinutí spojené do trojúhelníku je jejich nezbytnou součástí. Bez tohoto vinutí by autotransformátor v případě nesymetrického zatížení či poruchy nemohl správně pracovat. Terciární vinutí je obvykle dimenzováno na třetinový výkon celého autotransformátoru. To odpovídá maximálnímu možnému proudu, který by vinutím tekla v případě jednopólového zkratu.



Obr.2) Připojení kompenzační tlumivky do sítě
a) Připojení přímo na síť b) Připojení k terciárnímu vinutí autotransformátoru c) Připojení na sekundární straně

Terciární vinutí je většinou navrženo pro napětí v hladinách 12 kV – 36 kV, je vyvedeno průchodkami na víko olejové nádoby autotransformátoru. Kromě připojení kompenzace je možné jej využít i pro napájení vlastní spotřeby rozvodny.

Do napěťové hladiny 121 kV se používají pro přímé připojení na síť i pro připojení k terciárnímu vinutí autotransformátoru vzduchové kompenzační tlumivky s fázovými cívkami umístěnými nad sebou nebo vedle sebe (Obr.3, převzato z [26]). V současné době jsou výrobci nabízeny sady tlumivek s celkovým třífázovým výkonem dosahujícím 100MVar [27].



Obr.3) Kompenzační tlumivky Nokian Capacitors Ltd [26]

V napěťových hladinách nad 121kV, nebo i při nižším napětí s ohledem na místní zvyklosti, se kompenzační tlumivky vyrábějí v olejovém provedení a bývají připojeny přímo na síť. Toto řešení je nezbytné i v případě, kdy jsou požadovány velké induktivní výkony a také tehdy, kdy není možné volit z nejrůznějších důvodů alternativu připojení k terciárnímu vinutí

autotransformátoru. V tomto případě se používají tlumivky, které se svým vnějším i vnitřním provedením příliš neliší od konstrukce velkých olejových transformátorů.

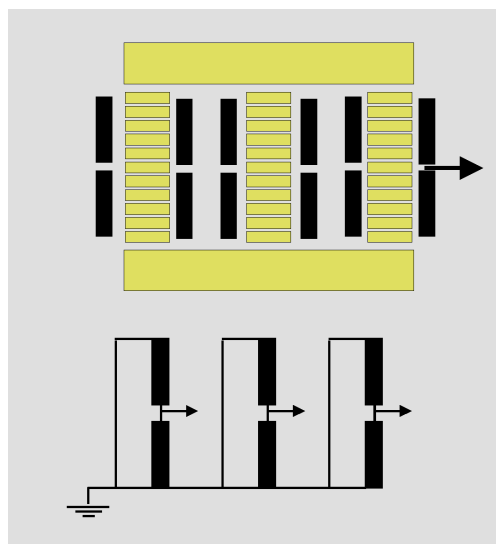


Obr.4) Kompenzační tlumivka Siemens [21], 150 MVar/345 kV.

Jsou umístěny v olejových nádobách s příslušným chladicím systémem, konce vinutí jsou průchodkami vyvedeny na víko chladicí nádoby. V této aplikaci se používají tlumivky s největšími dosahovanými reaktivními výkony vůbec. Jejich hodnoty dosahují řádově stovek MVar (Obr.č.4, převzato z [21]).

Pro velké olejové kompenzační tlumivky se používá koncepce s jádrovým i plášťovým magnetickým obvodem [20]. Vzájemné porovnání výhod a nevýhod obou typů provedení je v [17]. Tyto tlumivky bývají součástí výrobního programu výrobců velkých olejových transformátorů [21], [22], [23], [24] výroba je náročná na speciální technologické zařízení.

U konstrukce s jádrovým magnetickým obvodem jsou na jádra magnetického obvodu nasazeny koaxiální válcové cívky vinutí (Obr.5).



Obr.5) Schématické znázornění umístění vinutí na magnetickém obvodu a schéma zapojení

Jádra jsou rozdělena velkým počtem vzduchových mezer. Pokud je tlumivka určena pro provoz v síti s účinně uzemněným nulovým bodem, uzemňuje se i nulový bod vinutí tlumivky, které je spojeno do hvězdy. Tlumivku je možné v tomto případě navrhnout s takzvanou redukovanou nebo odstupňovanou izolací, kdy je nulový bod navržen a zkoušen na podstatně menší hodnotu napětí, než fázové vývody tlumivky (pro jmenovité napětí 400kV a zkušební napětí pro fázové vývody AC 630kV je zkušební napětí nulového bodu AC 75kV). Vinutí v tomto případě sestává ze dvou paralelních částí nad sebou se vstupem uprostřed a propojenými nulovými konci na stranách (Obr.5). Tím je možno výrazně redukovat izolaci cívek proti spojkám uzemněného magnetického obvodu a zmenšit izolační vzdálenosti. Sloupky jádra magnetického obvodu, které obsahují řadu vzduchových mezer, jsou rozděleny na větší počet diskových segmentů poskládaných z transformátorových plechů nebo svinutých z plechových svitků (Obr.6, převzato z [8]). Tyto části je třeba vyrobit dostatečně mechanicky pevné [20] a mezi sebou je oddělit mechanicky odolnými distančními segmenty (Obr.7, převzato z [8]).

Jednotlivé části magnetického obvodu jsou cyklicky namáhány mechanickými rázy o dvojnásobku síťového kmítočtu. Velikost působících sil může dosahovat značné hodnoty, jedná se navíc o trvalé namáhání. Materiál v mezerách musí být nejen pevný, nesmí vyvolávat při chvění magnetického obvodu nepřijatelný hluk.

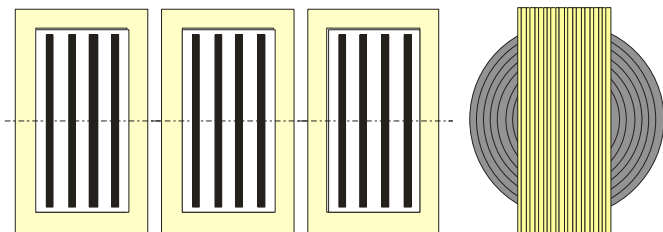


Obr.6) Sestavený magnetický obvod se vzduchovými mezerami VA TECH ELIN Transformatoren [8]



Obr.7) Detail magnetického obvodu se vzduchovými mezerami a distančními keramickými vložkami VA TECH ELIN Transformatoren [8]

Alternativou k jádrové koncepci magnetického obvodu tlumivek je plášťová konstrukce[20], u které jsou do stínícího pláště jednofázové jednotky axiálně vloženy diskové cívky (Obr.8). Toto uspořádání je vhodné i pro třífázové provedení, u kterého jsou relativně samostatné fázové jednotky umístěny vedle sebe nebo nad sebou ve společné olejové chladicí nádobě (Obr.8). Pro mezní výkony se používají i samostatné jednofázové jednotky ve vlastní olejové nádobě (Obr.9,10, převzato z [23]).



Obr.8) Schématické znázornění umístění vinutí tlumivky v plášti magnetického obvodu



Obr.9) Magnetický obvod a vinutí jednofázové jednotky 50MVar,500/√3kV,MITSUBISHI-ElectricPowerProducts [23]



Obr.10) Sestavená jednofázová jednotka 50MVar,500/√3kV,MITSUBISHI-ElectricPowerProducts [23]

2.2. SPÍNANÉ TLUMIVKY

Velikost jalového výkonu, který je potřebný ke kompenzaci sítí nebo jiných zařízení, je dána okamžitou velikostí a charakterem připojené zátěže a může být značně proměnná. Často dochází i ke skokovým změnám zatížení. Těmto změnám musí být přizpůsobeny i dostatečně rychlé změny dodávaného jalového kompenzačního výkonu. V levnější alternativě se tento problém řeší skokovým připojováním a odpojováním kompenzačních tlumivek nebo jednotek kondenzátorových baterií.



Obr.11) Vícevrstvá vzduchová tlumivka PEC [28]

Princip použití i vlastní podoba kompenzačních tlumivek tohoto typu se neliší od tlumivek určených pro trvalé přímé nebo nepřímé připojení na síť (Obr.11, převzato z [28]).

Každé připojení a odpojení tlumivky je však doprovázeno proudovým a napěťovým přechodným dějem. Při spínání tlumivek velkých reaktivních výkonů je tento problém zvláště markantní. Existuje řada doporučení, jak při spínání postupovat a jak navrhnout a ochránit vlastní tlumivku i výkonový vypínač, který ji spíná [4],[5], [7], [11].

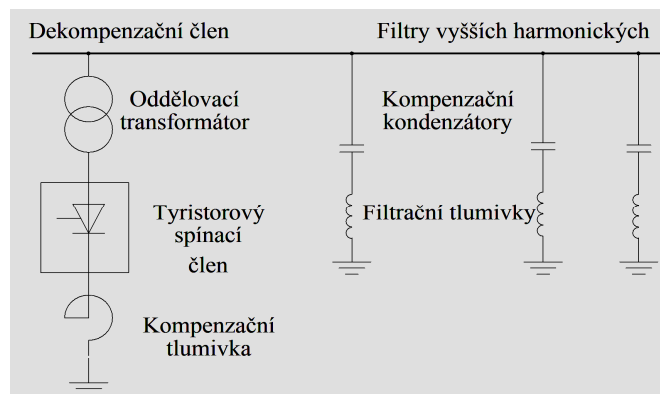
V případě potřeby plynulé regulace jalového kompenzačního výkonu se používají takzvané statické kompenzátory jalového výkonu (viz odstavec 2.3). Do série s tlumivkami je zapojen tyristorový spínací prvek (Obr.12), jehož cyklickým spínáním je možné dosáhnout plynulé regulace dodávaného induktivního jalového výkonu. Celý tento systém se chová jako tlumivka s proměnnou indukčností.

Podobnou funkci plnily v minulosti rotační kompenzátory, které měly podobu synchronních točivých elektrických strojů pracujících v různých režimech daných velikostí buzení. Jejich provoz však byl náročnější a méně spolehlivý.

2.3. STATICKÉ KOMPENZAČNÍ JALOVÉHO VÝKONU

Potřeba regulace jalového výkonu není zdaleka omezena pouze na aplikace týkající se distribuce elektrické energie v sítích. Podobné problémy vznikají i v průmyslu a dopravě při provozování různých zařízení, která zatěžují síť jalovým, často i značně časově proměnným a navíc ještě neharmonickým proudem [9],[12],[13]. Klasickým případem takové zátěže jsou elektrické obloukové pece. Stálé přerušování oblouku může působit rázy výkonu, které jsou doprovázeny vznikem takzvaného flickeru (kolísáním napětí s relativně nízkým kmitočtem $\approx 5\text{--}10\text{Hz}$) [12], [19]. Podobnou zátěží jsou i válcovací stolice ve válcovnách a pohony těžních strojů v dolech. Pro kompenzaci účinníku a filtraci vyšších harmonických se

v těchto případech používají takzvané statické kompenzátory účinníku [8],[13],[15],[19],[34],[38],[39]. Principiální schéma je na Obr.12 .



Obr.12) Principiální zapojení statického kompenzátoru

Paralelně ke spínané tlumivce, která se nazývá dekompenzační, jsou připojeny kondenzátory, které plní dvojí funkci. Dodávají kapacitní jalový výkon a současně tvoří s takzvanými filtračními tlumivkami LC filtry pro filtraci vyšších harmonických proudů, které produkuje jak vlastní statický kompenzátor (spínaná tlumivka), tak i připojená zátěž. Jalový výkon na výstupu kompenzátoru je daný rozdílem induktivního jalového výkonu dekompenzačních tlumivek a kapacitního jalového výkonu kondenzátorů. Kompenzační zařízení umožní výsledně dodávat jak induktivní, tak kapacitní výkon a navíc dokáže s velkou dynamikou reagovat na rychlé změny v potřebě jalového výkonu.

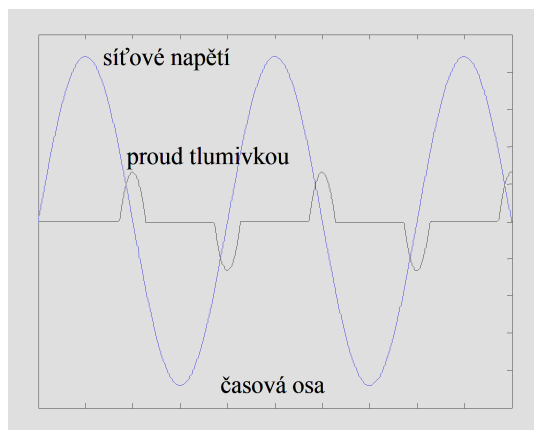
Dekompenzační tlumivky jsou obvykle zapojeny do trojúhelníku, ve kterém se mohou uzavírat konfázní harmonické složky proudu [34], [38],[39].



Obr.13) Kompenzační tlumivky Nokian Capacitors Ltd [26]

Z hlediska napěťového dimenzování tyristorového členu je výhodné rozdělit tlumivku na dvě části a tyristorový člen zapojit uprostřed (Obr.13, převzato z [26]).

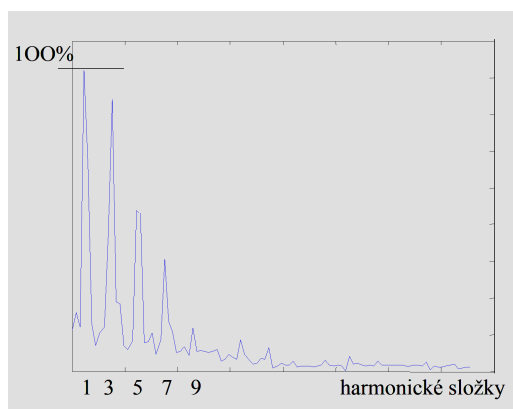
Proud, který prochází spínanou tlumivkou, je neharmonický, časový průběh proudu je závislý na okamžiku sepnutí tyristorového členu. Na Obr.14 je pro ilustraci znázorněn časový průběh proudu pro úhel sepnutí 15° (počítáno od průchodu napětí nulou).



Obr.14) Časový průběh proudu procházejícího tlumivkou

Pro stejný průběh proudu je na Obr.15 znázorněno procentní rozložení složek vyšších harmonických proudu ve vztahu k první harmonické.

Vyšší harmonické složky je obvykle třeba filtrovat pomocí paralelně připojených sériových LC filtrů. Tím se zabrání jejich zpětnému negativnímu působení na síť.



Obr.15) Harmonické složení proudu v kompenzační tlumivce

3. TLUMIVKY PRO OMEZENÍ PROUDU

Tlumivky tohoto typu jsou určeny pro sériové zapojení do systému a slouží k omezení nadproudů a zkratových proudů. V elektrických sítích se používají ve všech napěťových hladinách (Obr.16, převzato z [29]).



Obr.16) Sítové sériové tlumivky 400 kV Hilkar Electric Ltd [29]

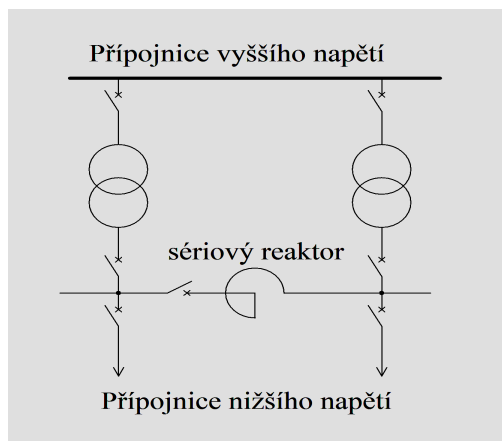
Velikost zkratového proudu by byla bez doplnění reaktorů omezena pouze reaktancí použitých generátorů, transformátorů a vedení, což obvykle není dostatečné. V případě zkratů by mohlo dojít ke vzniku nadproudů, jejichž hodnota by přesáhla přípustnou mez.

Přípustná hladina proudu je určena hodnotou, na kterou jsou dimenzovány všechny prvky soustavy, počínajíc generátory a transformátory, až po rozvodné vedení a všechny přístroje v něm obsažené (vypínače, odpínače, odpojovače, měřicí transformátory). Čím větší je zkratová odolnost jednotlivých částí, tím větší je i cena na jejich pořízení.

Zařazením sériových reaktorů lze velikost zkratového proudu omezit na dohodnutou mez, na druhou stranu však vznikají na tlumivkách i za normálního provozu určité úbytky napětí a ztráty. Proto je třeba volit kompromisní řešení.

3.1. OBVYKLÁ ZAPOJENÍ TLUMIVEK PRO OMEZENÍ PROUDU

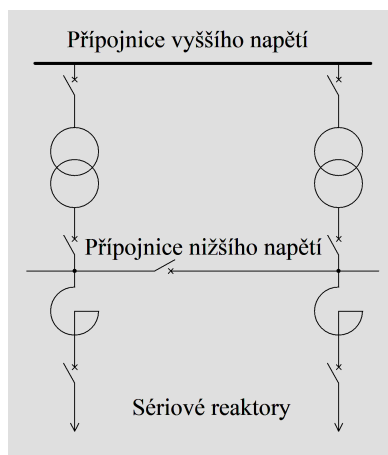
Existuje mnoho způsobů zapojení omezovacích tlumivek v sítích. Na Obr.17 a Obr.18 jsou naznačeny dva běžně používané způsoby. Tlumivky jsou zapojeny buď přímo do přívodu napájecích nebo distribučních vedení (Phase reactors), nebo slouží k propojení přípojníc při jejich příčném nebo podélném dělení (Bus-Tie Reactors).



Obr.17) Sériové reaktory použité při podélném dělení přípojníc

Vzájemné podrobné porovnání obou uvedených variant je v [6]. Výhody jednoho zapojení vůči druhému jsou závislé na počtu napájecích a napájených míst, celkovém výkonovém rozložení zdrojů a požadavcích na velikost omezeného zkratového proudu v jednotlivých částech.

Z konstrukčního hlediska se obvykle jedná o vzduchové tlumivky ve venkovním provedení běžné konstrukce [20], které jsou umístěny na vhodných podpěrných izolátorech (Obr.19, Obr.20, převzato z [27]), nebo jsou přímo připojeny mezi vodiče vysokonapěťového vedení (Obr.16, převzato z [29]).



Obr.18) Tlumivky zařazené přímo do napájeného vedení



Obr.19) Tlumivky na vývodech napájeného vedení (Phase reactors) Trench Electric [27]

Někdy je nutné doplnit reaktanci přímo u některých síťových prvků. Typickým příkladem jsou alternátory a také autotransformátory, jejichž reaktance vychází při ekonomickém návrhu stroje podstatně menší, než reaktance u transformátoru s galvanicky oddělenými vinutími. Ekonomickým návrhem se v tomto smyslu rozumí návrh optimalizovaný na nejnižší cenu s ohledem na dodržení dovoleného oteplení a zkratové odolnosti.



Obr.20) Reaktory mezi přípojnícemi (Bus-Tie Reactors) Trench Electric [27]

Pro rozdělení přípojníc je možno použít i diferenciálních reaktorů, jak je to popsáno v odstavci 3.5.

3.2. TLUMIVKY PRO SPOUŠTĚNÍ VELKÝCH TŘÍFÁZOVÝCH MOTORŮ

Velké střídavé třífázové synchronní i asynchronní elektromotory není možné s ohledem na velké zapínací proudy připojit při rozběhu přímo na síť.

Ke spouštění se používají předřazené rezistory, autotransformatory, nebo tlumivky, které se nazývají spouštěcí (Motor Starting Reactors). Vinutí tlumivek bývá často opatřeno odbočkami, které se v průběhu spouštěcího cyklu postupně vyřazují a po rozběhu motoru zcela odpojí. Po dobu spouštění se takto dosáhne snížení napětí na svorkách motoru a tedy i žádaného zmenšení proudu ze sítě. Se zmenšením napětí a proudu dochází současně k nežádoucímu zmenšení točivého momentu. Jednotlivé spouštěcí stupně musí být navrženy s ohledem na momentovou charakteristiku zátěže tak, aby bylo dosaženo vždy úspěšného rozběhu. Tlumivky pro spouštění velkých motorů jsou často navrhovány v podobě robustních vzduchových cívek umístěných nad sebou a stažených ocelovými svorníky nebo bandážemi (viz Obr.21, převzato z [29]).

Spouštěcí tlumivku není nutno navrhovat na trvalý provoz, rozhodující nejsou ztráty, ale oteplení po dobu spouštění a mechanická pevnost. Pokud se nejedná o speciální aplikaci pro motor s přerušovaným chodem, obvykle se při návrhu počítá s třemi spuštěními následujícími těsně po sobě o době trvání 3x20s. Odvod tepla chlazením se neuvažuje a počítá se s celým ztrátovým výkonem, který se pomyslně akumuluje v tělese tlumivky a působí její oteplení.



Obr.21) Tlumivka pro spouštění velkých třífázových elektromotorů HILKAR Electric Ltd [29]

Pokud jsou spouštěcí tlumivky navrženy s feromagnetickým obvodem, je třeba zajistit, aby nedošlo v žádném provozním stavu k přesycení magnetického obvodu. V případě přesycení omezuje tlumivka zapínací proud velmi málo a ten potom může dosáhnout téměř stejných hodnot jako bez tlumivek. Při spouštění motoru pomocí tlumivek se napětí na jeho svorkách plynule zvětšuje, tak jak se s otáčkami motoru snižuje proud a tedy i úbytek napětí. Start je poměrně rychlý a plynulý bez velkých proudových nárazů.

Výhodou spouštění pomocí autotransformátoru je menší proud na síťové straně, který odpovídá závitovému převodu autotransformátoru. Kombinací těchto dvou způsobů je speciální autotransformátor, který má magnetický obvod s velkým množstvím vzduchových

mezer v jádrech. V první fázi spouštění pracuje jako autotransformátor a potom po rozpojení společné části vinutí jako tlumivka.

3.3. TLUMIVKY PRO OBLOUKOVÉ PECE

Specifickým druhem sériových tlumivek jsou tlumivky určené pro obloukové pece (Electric Arc Furnace Reactors), (Obr.22, převzato z [27]). Tyto tlumivky bývají zapojeny na primární straně pecových transformátorů a plní současně několik funkcí.



Obr.22) Pecové tlumivky Trench Electric [27]

Zvyšují reaktanci celého zařízení tak, aby se udržel zkratový proud v technicky akceptovatelném rozmezí 1.8 až dvojnásobek jmenovitého proudu. Zejména u pecí na tavení železného šrotu, kde dochází k častým zkratům mezi vsázkou a elektrodami, může docházet k velkému kolísání výkonu a proudu. To se zpětně projeví negativním působením na síť. Dochází ke kolísání napětí v síti s relativně nízkým kmitočtem, které se přímo viditelně projevuje například blikáním osvětlení, tento jev se nazývá flicker [12], [19]. Elektrický oblouk je ze své podstaty nestabilní, po zapálení oblouku je jeho voltampérová charakteristika negativní. Tlumivka přispívá ke zvýšení stability oblouku a nastavení vhodného pracovního bodu pece pro ekonomickou tavbu pokud možno s malým proudem a malou spotřebou elektrod [19].

Obloukové pece, a k nim příslušející pecové transformátory a sériové tlumivky, se vyrábějí v celé obrovské škále výkonů. K největším na světě patří zařízení pro obloukovou pec 250 tun instalované v ocelárně Gebze/Kocaeli v Turecku. Jeden cyklus tavby zde trvá 45 minut. Pro napájení této pece je určen transformátor 265 MVA a reaktor 77.5 MVar.

Tlumivky pro pecové aplikace musí být navrženy s ohledem na extrémní namáhání opakovanými proudovými rázy. Tlumivka musí být navíc v celé pracovní oblasti dostatečně lineární. Tomu dobře

odpovídají vzduchem chlazené tlumivky umístěné vně pecového transformátoru (Obr.22, převzato z [27]), ty jsou však použitelné pouze pro menší napájecí napětí a relativně nižší výkony.

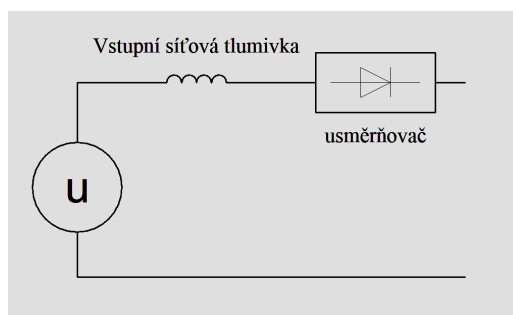
Pro velké výkony se používají tlumivky v olejovém provedení, které jsou umístěny přímo v nádobě s pecovým transformátorem, nebo mají separátní olejovou nádobu. Obvykle jsou v provedení s magnetickým stínícím pláštěm bez jader zasahujících do vinutí [20]. Tlumivky se vzduchovými mezerami nejsou s ohledem na proudové rázy a linearitu příliš vhodné. Magnetický obvod by musel být sycen s ohledem na velmi malé hodnoty magnetické indukce. Magnetický obvod se spoustou sériově řazených vzduchových mezer je navíc konstrukčně složitý a není možné ho tak snadno mechanicky zajistit [20].

Reaktanci tlumivek určených pro obloukové pece je nutné s ohledem na fázi technologického procesu průběžně měnit. K tomuto účelu slouží odbočky ve vinutí, které je třeba dálkově přepínat. Pro obloukové pece malých výkonů dobře postačí levné přepojovače odboček bez zatížení, nebo různé typy stykačů. Pro velké výkony je častým požadavkem měnit odbočky za plného provozu pod zatížením. Takové tlumivky jsou potom opatřeny nákladnými a konstrukčně složitými přepínacími odbočkami stejně jako velké výkonové transformátory.

3.4. TLUMIVKY V SÉRII S USMĚRŇOVAČI, KOMUTAČNÍ TLUMIVKY

Po připojení usměrňovače je síť zatěžována proudy s vysokým obsahem harmonických složek. Jejich časový průběh může mít v případě vyhlazeného proudu na výstupu podobu obdélníkových pulzů. Reaktance vřazená na vstupní straně usměrňovače přispěje k vylepšení těchto časových průběhů a jejich harmonického spektra [31]. Pokud je současně nutné snížit napětí na vstupu usměrňovače ve vztahu k napájecí síti, plní tuto úlohu transformátory a autotransformátory zařazené na vstupní straně.

Pokud je usměrňovač připojen přímo k síti, je možné využít řešení pomocí předřazené sériové tlumivky na vstupní straně (Obr.23).

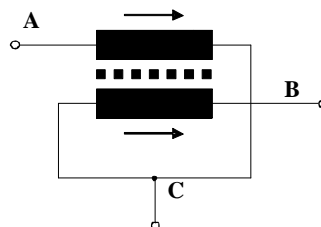


Obr.23) Tlumivka na vstupní straně usměrňovače

Tato tlumivka plní současně i další funkci. Při spínacích pochodech v obvodech výkonové elektroniky pomocí tyristorů dochází k takzvaným komutacím, kdy je proud v krátkém časovém okamžiku převeden z jedné větve tyristorů na druhou. Tyto stavy se z hlediska zdroje do určité míry podobají zkratům, v soustavě se objeví impulsní proudy, které mohou zpětně vyvolat impulsní zkreslení síťového napětí. Předřazená tlumivka snižuje velikost těchto komutačních proudů.

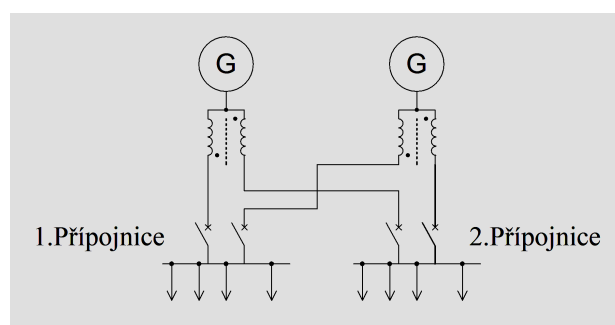
3.5. DIFERENCIÁLNÍ REAKTORY

Diferenciální reaktory (Duplex Reaktors) sestávají ze dvou samostatných vinutí propojených vývodem uprostřed (Obr.24). Obě části vinutí jsou navrženy tak, aby měly co možná největší magnetickou vazbu. V praxi se to často realizuje tak, že na magnetický obvod se vzduchovými mezerami jsou umístěny dvě cívky se závitami proloženými do sebe.



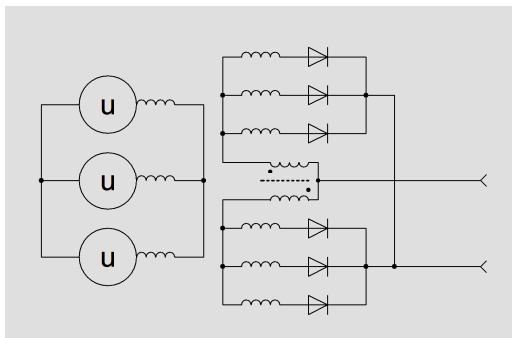
Obr.24) Principiální schéma diferenciálního reaktoru

Pro proudy tekoucí mezi svorkami A a B podle Obr.24 představuje tlumivka relativně velkou reaktanci, protože magnetické pole obou částí působí souhlasně a sčítá se. Pro stejně velké proudy, které by tekly od svorky C ke svorce A a současně od C ke svorce B představuje tlumivka malou reaktanci, magnetická pole obou částí vinutí se odčítají a navzájem kompenzují.



Obr.25) Rozdělení výkonu ze dvou generátorů do dvou nezávislých míst

Oblast použití pro takový typ tlumivek je velmi široká [14]. Používají se k rozdělení výkonu či proudu z jednoho zdroje do dvou obvodů, které zůstávají navzájem nezávislé. Stejně tak je možné spojit dva střídavé zdroje paralelně tak, aby mohly pracovat do stejné zátěže. Kombinace takových řešení je na Obr.25.



Obr.26) Zapojení usměrňovače s nulovou tlumivkou

Podobně lze použít tyto tlumivky při paralelním propojení usměrňovačů, měničů a jiných zařízení výkonové elektroniky. Při prostém paralelním propojení by docházelo k nežádoucímu vzájemnému ovlivňování, například k nežádoucím komutacím mezi usměrňovači. Stejným způsobem je možné rozdělit výkon mezi přípojnice v rozvodnách.

Na Obr.26 je šestipulzní zapojení usměrňovače s tzv. nulovou tlumivkou (double-star rectifier with interphase transformer). Tlumivka představuje pro stejnosměrný proud tekoucí středním vývodem malou reaktanci, pro proud, který by se uzavíral mezi uzly vinutí trojvinutového transformátoru spojených do hvězdy, velkou reaktanci.

3.6. TLUMIVKY PRO REGULACI TOKU VÝKONU V SÍTÍCH

Tlumivky pro regulaci výkonu v sítích (Load Balancing Reactors) jsou podle potřeby vřazovány do vedení, mění reaktanci a tím ovlivňují tok výkonu v síti.

Energetická soustava sloužící pro výrobu přenos a distribuci elektrické energie je velmi složitý systém sestávající z velkého počtu zdrojů a spotřebičů navzájem provázaných sítí přenosových vedení, jejichž konfigurace se neustále mění. Energetické systémy jsou velice rozsáhlé a nejsou obvykle omezeny hranicemi jednotlivých států, jsou mezi sebou přímo propojeny, jak je tomu i v Evropě. Způsob, jak regulovat takovou soustavu aby se udržela ve stabilním stavu a výkon tekla vždy v náležitém poměru a náležitém směru, je součástí komplikovaných strategických studií a modelování [9].



Obr.27) Tlumivky pro regulaci toku výkonu TRENCH [27]

Tok výkonu jednotlivých zdrojů a jeho rozdělení do jednotlivých úseků vedení je dán reaktancemi vedení a rozložením napětí v daných bodech sítě. Cílem je dosáhnout toho, aby byly všechny zdroje a přenosové cesty rovnoměrně zatíženy s ohledem na jejich jmenovité hodnoty. Tím lze potom dosáhnout i maximálního možného výkonu, který může celá soustava přenášet. Tento výkon potom nebude limitován nejslabším místem v soustavě. Nerovnoměrné zatížení je navíc spojeno se zvýšenými ztrátami a potenciálně může vést k nestabilitě v případě výpadku přetíženého místa. Za nepříznivých okolností může následně vyústit v lavinovitý výpadek celé soustavy.

K regulaci toku výkonu je v energetické soustavě k dispozici několik prostředků, ke kterým patří například možnost regulace napětí na generátorech a regulačních transformátorech nebo možnost regulace jalového výkonu pomocí kompenzačních zařízení. Jedním z důležitých způsobů regulace je operativní změna reaktance jednotlivých částí vedení. K tomuto účelu slouží speciální reaktory, které jsou podle potřeby vřazovány do vedení. Tyto reaktory jsou v normě IEEE [3] označeny jako „Load Balancing Reactors“, obvykle se vyrábějí v podobě vzduchových cívek (Obr.8, převzato z [27]), které jsou pomocí výkonových vypínačů vřazovány sériově do vedení a jsou použitelné ve všech napěťových hladinách.

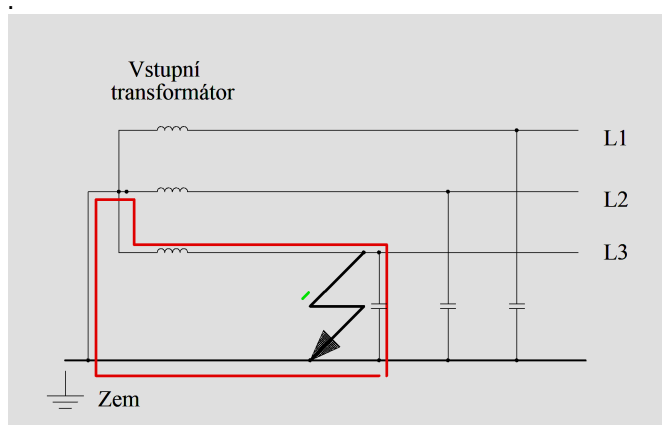
4. TLUMIVKY UZEMŇUJÍCÍ NULOVÝ VODIČ SOUSTAVY

V třífázové soustavě, do které jsou zapojeny stroje sloužící k výrobě a distribuci elektrické energie, může být nulový bod zcela izolován od země, nebo spojen se zemí několika způsoby. Na způsobu uzemnění je potom závislé chování soustavy v případě zemního spojení jedné či několika fází.

V prvním krajním případě je nulový bod přímo uzemněn. Při zemním spojení teče postiženou fází a zemí relativně značný proud [9]. Jeho velikost je dána zkratovým

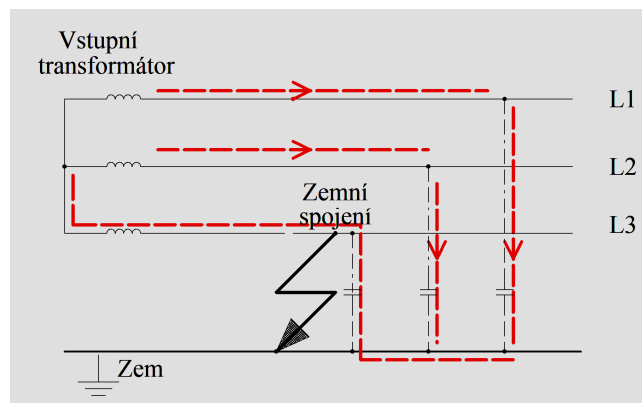
výkonem sítě. Tato závada je obvykle během krátkého časového úseku vypnuta ochranami. Napětí nepoškozených fází proti zemi zůstává při jednopólovém zemním spojení na hodnotě fázového napětí soustavy (Obr.28).

Nevýhodou tohoto řešení je tedy velký proud tekoucí při zemním spojení, na který musí být dimenzovány všechny prvky v systému. Výhodou je relativně nízké napěťové namáhání. Izolace vodičů může být dimenzována na fázové napětí proti zemi. To se týká nejen vedení, ale všech prvků, které jsou v soustavě zařazeny. Transformátory mohou být navrženy s redukovanou izolací nulového bodu.



Obr.28) Soustava s přímo uzemněným nulovým bodem

V druhém krajním případě je nulový bod od země izolován. Pokud dojde k zemnímu spojení jedné fáze, uzavírá se zbylými dvěma fázemi a zemí proud, který teče zemními kapacitami těchto fází (Obr.29). Velikost tohoto proudu je relativně malá a není důvodem k okamžitému odpojení vedení. Napětí dvou nepoškozených fází proti zemi však vzroste teoreticky na sdruženou hodnotu a na tu musí být dimenzována izolace vedení a všech komponentů (Obr.29). Když se přidruží navíc různá rezonanční přepětí, ke kterým může při zemním spojení dojít, je izolace vystavena podstatně většímu napěťovému namáhání, než v nominálním provozním stavu. Takové namáhání může vést na slabších místech izolace (například znečištěné izolátory) k výbojům a elektrickému oblouku, který má podobné účinky jako při svařování elektrickým proudem. U transformátorů může například nenávratně poškodit nejen izolaci vinutí, ale i magnetické obvody takovým způsobem, že to již bude neopravitelné. Proud, který v tomto případě obvodem teče, má kapacitní charakter a obtížně se vypíná vypínacími prvky [7],[8],[9].



Obr.29) Soustava s izolovaným nulovým bodem

Často se volí kompromisní řešení, kdy se nulový bod uzemňuje buď nízkou impedancí pomocí tlumivek nebo rezistorů (viz Obr.30, převzato z [26]), nebo se připojuje vysokou impedancí většinou pomocí zhášecích tlumivek (viz.kap.8).

V prvním případě se velikost proudu redukuje na hodnotu, kterou je možno ochrannými prvky vypnout.

Konkrétní způsob uzemnění závisí většinou na místních zvyklostech. V České republice je soustava 110kV a 400kV provozována s přímo uzemněným nulovým bodem, soustava 22kV je většinou uzemněna pomocí rezistorů nebo zhášecích tlumivek (viz kap.8).

Tlumivky a rezistory pro uzemnění nulového bodu se zapojují do nulových bodů generátorů, transformátorů a kompenzačních tlumivek. V případě, že jsou v síti elektrické stroje, které nemají nulový bod vyveden (vinutí transformátorů spojené do trojúhelníku), používá se k uzemnění nulového bodu speciálních zemnicích transformátorů a tlumivek (viz kap.7).



Obr.30) Zemnicí tlumivka Nokian Capacitors Ltd. [26]

Konstrukce tlumivek pro nízkohmové uzemnění nulového bodu je specifická v tom, že tlumivky nejsou určeny pro trvalé zatížení. Za normálního provozu je na nich relativně malé napětí a prochází jimi pouze proud daný nesymetrickým zatížením.

V případě poruchy teče těmito tlumivkami proud zemního spojení, jehož velikost může být podstatně větší než jmenovitý proud, doba trvání je však omezena dobou zapůsobení ochran pro vypnutí vedení (nepřesahuje 10 s). Konstrukce je tedy určena tím, aby tlumivka odolala mechanicky i tepelně účinkům proudu zemního spojení. Na ztráty vznikající během normálního provozu není třeba brát ohled.

Z napěťového hlediska jsou tlumivky pro uzemnění nulového bodu obvykle dimenzovány a zkoušeny na stejné napětí, jako fázové vývody.

4.1. TLUMIVKY URČENÉ K UZEMNĚNÍ NULOVÉHO BODU ALTERNÁTORU

Tyto tlumivky se zapojují do nulového bodu alternátorů a zvyšují reaktanci nulové složky v obvodu. Tímto opatřením se omezuje velikost proudu zemního spojení, který může u alternátoru dosáhnout větších hodnot, než proud při trojpólovém zkratu. V případě interního zemního spojení by mohl takový proud vyvolat vznik oblouku, který by dokázal poničit magnetický obvod a způsobit těžko opravitelnou závadu.

Tlumivka navíc omezuje velikost proudu třetí harmonické. Každý alternátor je navržen tak, aby generoval napětí s převážným podílem základní harmonické. Vždy se však v napěťovém průběhu vyskytuje určitá menší složka vyšších harmonických, z nichž nejpodstatnější je třetí harmonická. Tato složka napětí tvoří netočivou soustavu, jejíž velikost nepřesahuje jednotky procent. Dokáže však s ohledem na reaktanci nulové složky v obvodu vyvolat proud, jehož velikost je srovnatelná s jmenovitým proudem základní harmonické. Markantní situace nastává při paralelním propojení více generátorů, při kterém by se proudy třetí harmonické uzavíraly přímo mezi generátory.

5. TLUMIVKY TLUMÍCÍ

Tlumící tlumivky (Damping Reactors for Capacitor Banks) se zapojují do série s kondenzátory v kondenzátorových bateriích a slouží k omezení přechodných jevů vznikajících při připínání a odpínání kondenzátorů na síť.

Jedná se především o omezení nabíjecího proudu při připojení na střídavou síť nebo vybíjecího při poruše a zkratu. Omezují také přepětové kmity vyšších kmitočtů vznikajících při připnutí kondenzátorových baterií na síť [18].



Obr.31) Tlumící tlumivky HILKAR Electric Ltd připojené ke kondenzátorové baterii

K obzvláště velkým proudům může dojít v případě, kdy je připojena jedna kondenzátorová baterie k druhé, která je již pod napětím (Back-to-Back Switching). Viz [8], kap.15 – Protection of shunt capacitors.

Tlumící tlumivky jsou určeny pro vedení jmenovitého proudu a musí být navrženy tak, aby odolaly všem možným druhům přetížení, která připadají při provozu kondenzátorové baterie v úvahu. Tyto tlumivky jsou podobné klasickým sériovým tlumivkám, vyznačují se ale relativně nízkou indukčností a většími požadavky na odolnost proti napěťovému namáhání (Obr.31, převzato z [29]).

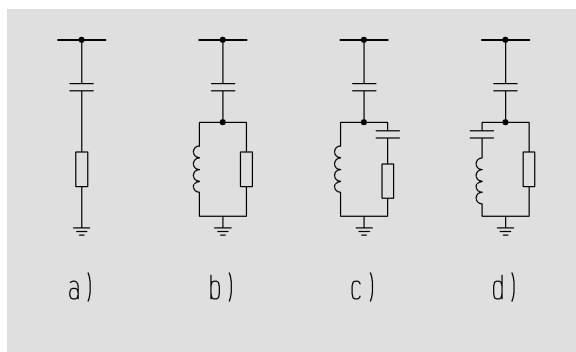
Kondenzátory v kondenzátorových bateriích představují pro proudy vyšších kmitočtů malou reaktanci, v případě velkého obsahu vyšších harmonických v síti hrozí jejich přetížení. Tlumivky se navrhuje tak, aby představovaly společně s kondenzátory zádrže pro vyšší harmonické složky.

Tlumící tlumivky jsou jednofázové nebo třífázové, obvykle vzduchové, pro vnitřní nebo venkovní použití.

6. FILTRAČNÍ TLUMIVKY

Filtrační tlumivky (Tuning Filter Reactor) jsou součástí LC filtrů (Obr.32, Obr.33 – přejato z [27]). Filtry slouží v zařízeních silnoproudé elektrotechniky k odstranění vyšších harmonických složek napětí, které mohou ovlivňovat kvalitu dodávané energie a způsobovat nežádoucí rušení [9],[12],[13].

Deformace harmonického napětí vyššími harmonickými složkami je způsobena úbytky napětí vlivem neharmonických proudů, které jsou vyvolány nelineární zátěží popřípadě různými prvky výkonové elektroniky, jako jsou usměrňovače, střídače, měniče kmitočtu.



Obr.32) Příklad zapojení filtrů typu dolní propust

Proud je nejen neharmonický ale i fázově posunutý vůči napětí. Klasickým zdrojem rušení jsou zařízení, jejichž činnost souvisí s elektrickým výboji a obloukem. Jsou to například obloukové pece[19], ale i zářivkové osvětlení.

Napětí deformované vyššími harmonickými složkami může mít zpětně vliv na spotřebiče zapojené do sítě. Potom i odebíraný proud je deformován vyššími harmonickými a to například u transformátorů a motorů způsobuje zvýšení ztrát a oteplení vinutí, u motorů podmiňuje navíc vznik takzvaných pulzačních momentů, které zvyšují hluk. Vyšší harmonické složky mohou způsobovat rušení elektronických přístrojů ve sdělovací i měřicí technice.

Zařízení je obvykle navrženo tak, že každý filtr má svoji harmonickou složku, na kterou je naladěn, někdy může jeden filtr současně potlačovat vliv i více harmonických složek.



Obr.33) Filtrační tlumivky Trench Electric Ltd. [27]

Kondenzátory ve filtrech slouží současně jako zdroj kapacitního výkonu, který je potřebný pro kompenzaci induktivní zátěže a zlepšení účinku.

Tlumivky filtru se navrhují s ohledem na celkový efektivní proud daný proudem základní harmonické a vyšších harmonických složek a také na požadovaný činitel jakosti tlumivky, který souvisí se strmostí celého filtru.

Je-li tlumivka navržena s ohledem na dovolené oteplení a mechanickou pevnost, často se stává, že je její činitel jakosti podstatně větší, než by bylo pro správnou funkci

filtru potřeba. Potom se do série s tlumivkami zapojují tlumicí rezistory, popřípadě se k tlumivkám přidává ztrátový prvek (například uzavřený závit nacházející se v magnetickém poli tlumivky), který velikost činitele jakosti redukuje.

Filtrační tlumivky jsou často opatřeny odbočkami, které slouží ke konkrétnímu přizpůsobení filtru daným podmínkám v síti a přesnému doladění vlastností.

O návrhu filtrů pojednává např. [8],kap.20 –Harmonic Filtering

6.1. TLUMIVKY PRO STEJNOSMĚRNÝ PŘENOS

Tlumivky pro stejnosměrný přenos (HVDC-Reactors) se používají v systémech HVDC (High Voltage Direct Current Transmission Systems). Tato zařízení slouží k alternativnímu stejnosměrnému přenosu elektrické energie.

Střídavý přenos elektrické energie se prosadil z důvodu mnoha výhod, které jsou spojeny se snadnější výrobou elektrické energie (generátory střídavého napětí-alternátory pro velké výkony) i snadnějším přenosem energie (převod napětí mezi jednotlivými napěťovými stupni pomocí transformátorů). Nevýhodou ve srovnání se stejnosměrným přenosem jsou vyšší přenosové ztráty na vedení způsobené skin efektem a všechny ostatní jevy plynoucí z chování vedení i zátěže jako soustavy s obecnou a navíc časově proměnnou impedancí. K těmto jevům patří například obtížná regulace napětí a toku činného výkonu, potřeba kompenzace jalového výkonu.

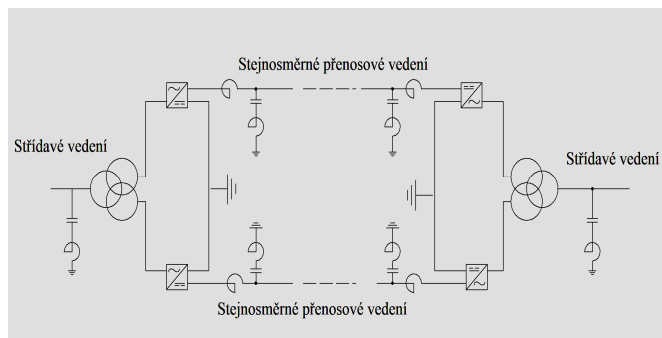
Stejnoscsměrný přenos má nižší přenosové ztráty, napětí i tok výkonu je možné regulovat podstatně jednodušším způsobem. Stejnoscsměrné napětí se však obtížně transformuje na hodnoty použitelné pro přenos. Tento problém je v současné době technicky dobře zvládnutelný, uvedené zařízení je však poměrně drahé a pro jeho racionální využití musí být splněny určité podmínky.

Bez stejnosměrného přenosu není možné se obejít v případě, kdy je nutno propojit energetické soustavy, které mají odlišné kmitočty, nebo které není možné z různých důvodů navzájem synchronizovat. V minulosti byla takto propojena nesynchronizovaná energetická soustava tehdejšího Československa a Rakouska (stanice Durnrohr 1983-1996) a mezi Českou republikou a Německem (1993-1996, Etzenricht). Jednalo se o takzvané stanice s „nulovou délkou vedení“ (back-to-back line), v současné době jsou sítě již propojeny přímo. Nevýhodou propojení rozsáhlých energetických systémů na střídavé straně může být i to, že zkratový výkon naroste nad přípustnou mez.

Další důležitou aplikací je propojení dvou energetických soustav na velkou vzdálenost bez možnosti přerušení, jak je tomu například v případě kabelového vedení pod mořskou hladinou. V takovém případě není možné použít zařízení pro kompenzaci jalového výkonu, propojení na

střídavé straně by bylo problematické. Nejdelší stejnosměrné vedení pod mořskou hladinou na světě propojuje Norsko a Holandsko (NorNed, 580km,r.2004).

Při stejnosměrném přenosu jsou tlumivky použity na několika místech[37]. Na obr.34 je principiální schéma stejnosměrného přenosu.



Obr.34) Principiální schéma stejnosměrného přenosu

Střídavé napětí jednoho energetického systému je transformováno a usměrněno, přenáшено po kabelové síti a na druhé straně opět přeměněno na střídavé třífázové napětí.



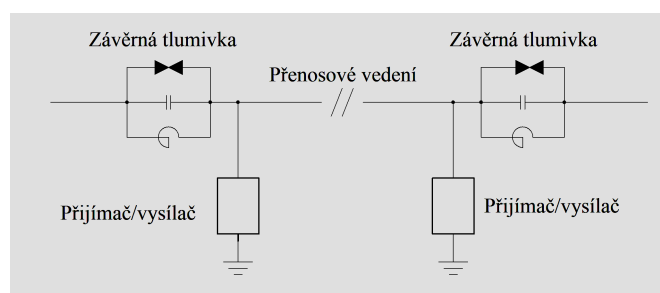
Obr.35) Vyhlazovací tlumivka Trench Austria určená pro stejnosměrný přenos [27]

Na vstupní i výstupní střídavé straně je zapojeno filtrační kompenzační zařízení, které zabraňuje pronikání vyšších harmonických složek do střídavé sítě a eliminuje jalový výkon produkovaný měniči. Na stejnosměrné straně jsou v sérii s vedením zapojeny tlumivky, které vyhlazují stejnosměrný proud a v případě poruchy omezují velikost zkratového proudu. I na stejnosměrné straně je paralelně připojeno filtrační zařízení, které eliminuje pronikání vyšších harmonických složek na stejnosměrné vedení. Na (obr.35, převzato z [27]) je vzduchová vyhlazovací tlumivka Trench-Austria.

6.2. ZÁDRŽE SIGNÁLU HDO

Přenosové vedení, které slouží primárně k rozvodu a distribuci elektrické energie, je možno velmi dobře využít i pro šíření jiných druhů signálů. Tyto signály mohou sloužit ke sdělovacím, řídicím a ovládacím účelům. Aby byl signál vyslán pouze do příslušné části vedení a nebyl v přenosové soustavě utlumen nebo pohlcen, používají se pásmové zádrže, které jsou tvořeny speciálními tlumivkami s vestavěnými laditelnými prvky. V případě zkratu v některé nepříslušející vzdálené části soustavy zádrže současně zabrání svedení signálu do země. Tyto tlumivky se nazývají závěrné [36], v zahraniční literatuře jsou označeny jako „Line Traps“ (Obr.36).

Způsob přenosu signálu po vedení je velice spolehlivý a ekonomicky výhodný s mnohostrannou možností využití. Lze jej použít pro dálkové ovládání (HDO), regulaci, signalizaci i měření v přenosové soustavě. Je použitelný pro služební telefonii související s provozem sítí, v poslední době také pro přenos datových souborů a přístup k internetu



Obr.36) Závěrné tlumivky, systémy HDO.



Obr.37) Závěrné tlumivky AREVA na vedení 400kV [32]

U systémů HDO (Hromadné dálkové ovládání) je řídicí signál modulován ve vysílačích na síťové napětí se základním kmitočtem 50Hz (Obr.36). Dobře se šíří po celé

síti, dokáže proniknout ze strany zvn a vvn (například rozvodny 400 kV) až do sítě nn v místě spotřeby energie. K příjmu signálu HDO slouží přijímače nastavené na odpovídající kmitočet (Obr.36).

Pásmové zádrže jsou zapojeny do série s příslušnou částí vedení a představují pro síťový kmitočet 50 Hz jen malou impedanci, pro únik signálu HDO však představují velkou impedanci. (Obr.37, převzato z [32]).

Kmitočet vysílačů a přijímačů HDO se často pohybuje v pásmu stovek Hertzů. Aby se nestalo, že bude tento signál pohlcen filtry filtračních zařízení, které jsou naladěny na vyšší harmonické základního síťového kmitočtu, bývají někdy těmito zádržemi opatřeny přímo filtrační a kompenzační stanice. Odlaďovací prvky musí být opatřeny i kondenzátory kompenzačních baterií, které by rovněž představovaly pro signály HDO malou impedanci a zkratovaly by je do země.

Tlumivky HDO jsou většinou vzduchové cívky, pro které jsou charakteristické mezery mezi závitů [32],[33]. Tím je potlačena jejich vlastní sériová kapacita. Součástí pásmové zádrže jsou kromě tlumivek i ladící elementy, které obsahují resistory, indukty a kapacitory a tvoří společně s tlumivkou odpovídající zádržný filtr. Tento filtr může být v případě potřeby naladěný i na několik zádržných kmitočtů [32]. Ladící zařízení je umístěno uvnitř tlumivky, kde se rovněž nachází svodič přepětí, který slouží k přepětové ochraně tlumivky (Obr.36).

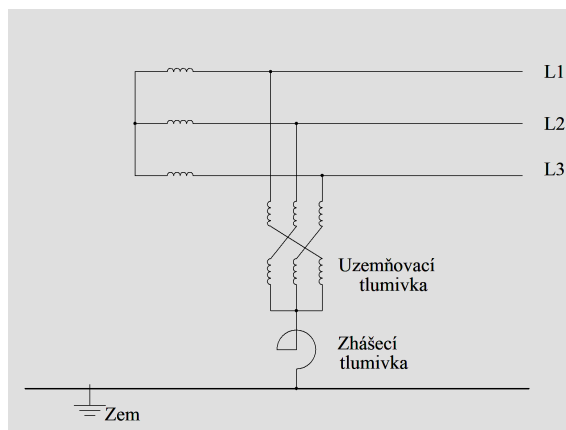
7. UZEMŇOVACÍ TRANSFORMÁTORY A

TLUMIVKY

Uzemňovací transformátory (Earthing transformers) se používají pro vytvoření nulového bodu v třífázových soustavách, ve kterých není nulový bod přímo přístupný (například sekundární vinutí transformátoru spojené do trojúhelníku). Takto uměle vytvořený nulový bod je potom možné uzemnit přímo, pomocí rezistorů, tlumivek nebo zhášecích tlumivek stejně jako vyvedený nulový bod.

Uzemňovací transformátor musí být schopen přenést proud, který vzniká při nesymetrickém zatížení nebo zkratu trojfázové soustavy. Při symetrickém zatížení je proud transformátorem prakticky nulový.

Aby transformátor dokázal takové proudy přenést, je potřebná malá nulová složka impedance. To je zajištěno zapojením vinutí do lomené hvězdy (Obr.38). Podobně se chová i transformátor, který má jedno vinutí spojené do trojúhelníku. Takové vinutí je potom možné s výhodou použít pro napájení vlastní spotřeby rozveden a trafostanic.



Obr.38) Schématické zapojení uzemňovací tlumivky s vedením spojeným do lomené hvězdy

Proudové zatížení uzemňovacího transformátoru je jednoznačně závislé na způsobu uzemnění nulového bodu.

V případě přímého či odporového uzemnění nulového bodu se jedná o proudy relativně velké, k tomu však dochází pouze při poruše a není to příliš častá situace. V tomto případě je proud časově omezen pouze na krátkou dobu, než dojde k zapůsobení ochrany. Rozhodujícím kritériem při návrhu takového transformátoru je potom odolnost proti tepelným a silovým účinkům zkratového proudu. Ztráty mají pouze podružný význam.

V případě použití zhášecí tlumivky je transformátor zatížen relativně malým proudem převážně činného charakteru. Jeho velikost je dána vlastnostmi zhášecí tlumivky. Toto zatížení je trvalé.

Uzemňovací transformátor, který bude použit ještě k napájení vlastní spotřeby, je třeba dimenzovat s ohledem na toto zatížení a potom platí všechny běžné podmínky, jako pro ostatní transformátory.

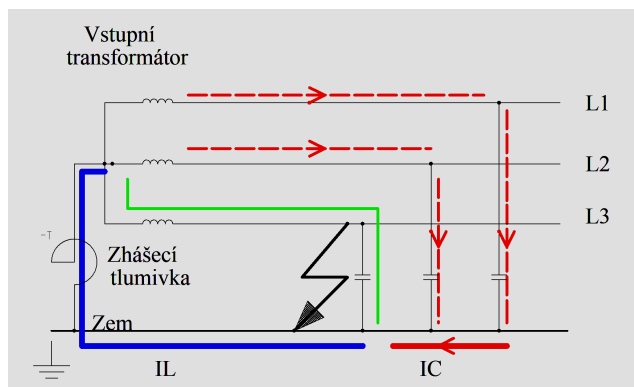
Tyto transformátory jsou převážně určeny pro venkovní použití, instalují se v transformovnách a rozvodnách společně s prvky pro uzemnění nulového bodu a ostatními komponenty. Mají tedy většinou olejové chlazení. Ve společné nádobě s transformátorem bývá někdy umístěna i tlumivka pro uzemnění nulového bodu. Olejové nádoby není obvykle nutné opatřovat velkým počtem chladících prvků (žeber nebo radiátorů). Vyplývá to z povahy jejich činnosti.

8. ZHÁŠECÍ TLUMIVKY

Zhášecí tlumivky (Arc Supression Reactors) se používají k rezonančnímu uzemnění nulového bodu soustavy [35].

V sítích vysokého a velmi vysokého napětí dochází často k jednopólovému zemnímu spojení, které je doprovázeno přepětovými jevy. Podle statistik je to až 80% případů všech poruch podobného typu. Důsledkem lokálních přepětí může být vznik elektrického oblouku, který se

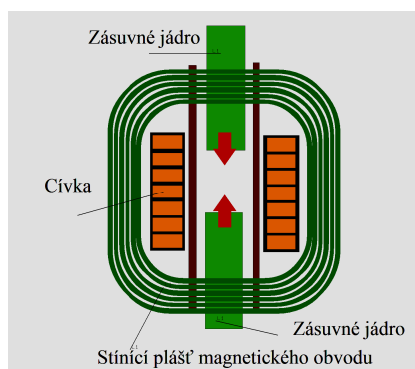
vytvoří v místech s nedostatečnou izolací (například znečištěné izolátory) a který dokáže izolaci nenávratně poškodit, nebo dokonce způsobit požár.



Obr.39) Nulový bod transformátoru uzemněný pomocí zhášecí tlumivky

Je experimentálně ověřeno, že velikost proudu zemního spojení musí přesáhnout určitou kritickou hodnotu, aby se mohl zapálit a udržet elektrický oblouk. Za tuto mez je považována hladina 8-10A.

Úkolem zhášecí tlumivky je udržet velikost kapacitního proudu zemního spojení pod touto přípustnou hodnotou. Jedná se tedy v podstatě o tlumivku s vysokou impedancí připojenou obvykle do nulového bodu transformátoru. Princip použití zhášecí tlumivky je založen na tom, že kapacitní proud zemního spojení nezátížené sítě je kompenzován indukčností tlumivky (Obr.39). V ideálním případě je celý systém naladěn do rezonance a obvodem teče pouze malý proud činného charakteru.



Obr.40) Principiální konstrukční uspořádání zhášecí tlumivky

Elektrická síť se svými parametry je značně proměnná soustava, v závislosti na čase se mění zatížení i konfigurace zdrojů. Také lokalita místa, ve kterém dojde k zemnímu spojení, je čistě náhodná záležitost a nelze ji předem předvídat. Kdyby měla zhášecí tlumivka jednu

neproměnnou hodnotu, nebylo by možné uvedený princip realizovat.

Aby bylo možno naladit indukčnost tlumivky do rezonance s kapacitami v obvodu, musí být velikost indukčnosti proměnná a navíc nastavitelná pod zatížením. Přepínání odboček by nebylo v tomto případě dostatečně efektivní ani technicky snadno proveditelné, problém se řeší speciálními tlumivkami s plynule proměnnou indukčností.

Zhášecí tlumivky jsou mezi ostatními elektrickými stroji netočivými (transformátory a tlumivkami) svou konstrukcí trochu neobvyklé. Jedná se o cívky, které jsou sice nasazeny na magnetickém obvodu se vzduchovými mezerami podobně jako ostatní tlumivky na feromagnetickém jádře, vzduchové mezery jsou však proměnné (Obr.40). Jejich velikost se plynule přestavuje pomocí mechanismu poháněného elektrickým pohonem, který je řízen elektronickým regulátorem. Indukčnost tlumivky je tak neustále přizpůsobována parametrům obvodu.

Kromě hlavního vinutí bývají zhášecí tlumivky ještě opatřeny měřicím vinutím pro měření napětí a pomocným vinutím, které slouží k připojení rezistoru. Rezistor usnadňuje rychlé vyhledání části vedení postiženého poruchou. K rozpoznání poruchy slouží obvykle směrová relé pracující na watmetrickém principu, aby se usnadnila jejich činnost, úmyslně se zvětšuje velikost činné složky zbytkového proudu.



Obr.41) Zhášecí tlumivky EEG České Budějovice

Zhášecí tlumivky jsou obvykle navrženy ve venkovním provedení v nádobách s olejovým chlazením (viz. Obr. 41,42 – převzato z [35]).



Obr.42) Zhášecí tlumivky EEG České Budějovice [35]

Výkon tlumivky je závislý na druhu sítě – kabelová síť, venkovní vedení. Použití plynule laditelné cívky umožní optimální kompenzaci zemního proudu a tím i optimální využití předností zhášení zemního spojení.

9. VYHLAZOVACÍ TLUMIVKY

Vyhlažovací tlumivky (Smoothing reactors) se používají pro snížení zvlnění elektrického proudu ve stejnosměrných obvodech. Potlačují vyšší harmonické složky proudu, které jsou superponovány na stejnosměrnou složku. V případě zkratu omezují strmost nárůstu proudu a zabraňují vzniku rezonancí.

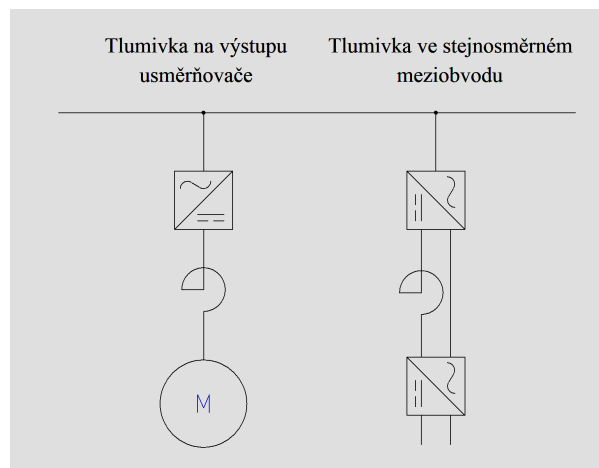
Zvlnění stejnosměrného proudu negativně ovlivňuje jak napájené zařízení, tak i vlastní polovodičový měnič.

U pohonů se stejnosměrným elektromotorem vyvolávají vyšší harmonické složky zvýšení ztrát a vznik parazitních pulzačních momentů elektromotorů, které jsou provázeny vibracemi. Měnírny pro stejnosměrnou trakci v městské dopravě i na železnici obsahují proto vyhlazovací tlumivky jako podstatnou část vedle trakčního transformátoru a usměrňovače. Vyhlažovací tlumivky jsou v tomto případě umístěny i na kolejových vozidlech.

Pro některé elektrochemické procesy je také požadován stejnosměrný proud s malým zvlněním. Tak je tomu například u zařízení pro galvanické pokovování, aby bylo dosaženo rovnoměrného pokovení materiálu. Podobná situace nastává i při obloukovém svařování stejnosměrným proudem.

V usměrňovačích a ostatních polovodičových měničích může docházet vlivem okamžitého přerušování elektrického proudu k nežádoucím vypnutím tyristorových spínacích prvků. To je obzvláště patrné, pokud se reguluje proud o malých hodnotách v blízkosti nuly.

Vyšší harmonické složky mají vliv i na sdělovací, měřicí a ostatní elektronické přístroje, do kterých se přenášejí a způsobují rušení.



Obr.43) Zapojení vyhlazovací tlumivky v obvodu stejnosměrného motoru a v proudovém stejnosměrném meziobvodu střídače

Vyhlažovací tlumivky se obvykle zapojují do série s polovodičovými usměrňovači a měniči, v případě střídače (zdroje harmonického napětí o vyšší kmitočtu) se zapojují do stejnosměrného meziobvodu mezi usměrňovač a střídač (Obr.43).



Obr.44) Vyhlažovací tlumivka Trench Austria GmbH[27]

Pro průmyslové aplikace s napětím do 36kV se obvykle používají vyhlazovací tlumivky v suchém provedení s feromagnetickým obvodem, stíněním nebo vzduchové (Obr.44, převzato z [27]). Pro velká napětí, která připadají v úvahu například při stejnosměrném přenosu, bývají chlazeny olejem a umístěny v nádobách, jako transformátory velkých výkonů pro venkovní prostředí.

10. ZÁVĚR

V článku byly popsány základní důležité aplikace pro použití tlumivek v silnoproudé elektrotechnice. Jako osnova pro členění tlumivek byla použita norma ČSN EN 60289 -Tlumivky [1]. Článek navazuje na [20], kde byly popsány základní druhy konstrukčního uspořádání a předchází dalším částem, které budou

věnovány konkrétním otázkám návrhu tlumivek jednotlivých skupin.

system, Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1992.

LITERATURA

- [1] ČSN EN 60289 Tlumivky
- [2] IEEE Std C57.21 IEEE Standard Requirements, Terminology and Test Code for Shunt Reactors Rated Over 500 kVA
- [3] IEEE Std C57.16 IEEE Standard Requirements, Terminology and Test Code for Dry-Type Air-Core Series-Connected Reactors
- [4] IEEE Std C37.109 Guide for the Protection of Shunt Reactors
- [5] IEEE Std C37.015 IEEE Application Guide for Shunt Reactor Switching
- [6] HARLOW, James,H.: Electric Power Transformer Engineering, CRC Press, 2007
- [7] SLUIS,L.: Transients in power systems, John Wiley & Sons Ltd., 2001
- [8] NATARAJAN,R.: Power System Capacitors, Taylor & Francis Group , 2005
- [9] DAS,J.C.: Power System Analysis - Short-Circuit Load Flow and Harmonics, Marcel Dekker, Inc., 2002
- [10] WINDERS,J.: Transformers Principles and Applications,Marcel Dekker, Inc.,2002
- [11] GRIGSBY,L.: Electric Power Engineering Handbook;CRC Press,2007
- [12] ARRILLAGA,J.,WATSON,N.R.: Power System Harmonics; John Wiley & Sons, Ltd; 2003
- [13] BAGGINI,A.: Handbook of Power Quality,John Wiley & Sons Ltd,2008
- [14] SCHILD,W.,PLANITZ,W.:Netzgestaltung mit Duplexdrosseln,Jahrbuchder Schiffbautechnischen Gesellschaft, 91. Band,1997
- [15] CARDOSO,M.,FILHO,B.:Thyristor Switched Series Reactor for Electric Arc Furnaces,Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE
- [16] REGGIANI,U.,GRANDI,G.,SANCINETO,G.,SERA,G.:Comparison between air-core and laminated iron-core inductors in filtering applications for switching converters, Power Electronics Congress, 2000. CIEP 2000. VII IEEE I
- [17] CANCINO,A.,OCON,R.,ENRIQUEZ,G.,MALEWSKI,R.:Core-form versus shell-form shunt reactors, utility and manufacturer position; CIGRÉ papers 2008 Group A2 - Transformatoren
- [18] DAS,J.C.:Effect of Medium Voltage Capacitor Bank switching surges in an industrial distribution system, Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1992.
- [19] HOLOUBEK,J.,PAWLAS,J.: Filtračně-kompenzační zařízení velkého výkonu, ELEKTRO, 11/2007
- [20] PANKRÁC,V.: Tlumivky v silnoprůdové elektrotechnice část – 1, Základní druhy konstrukčního uspořádání tlumivek, Elektrorevue 2009/2, dostupný z www.elektrorevue.cz
- [21] Shunt Reactors for Medium and High-Voltage Networks,Siemens AG, PTD Transformatorenwerk Nürnberg,Manufacturer's technical documentation, dostupný z www.ev.siemens.de
- [22] Shunt reactors , ABB Power Transmission (ABB in Ludwika,Sweden), Manufacturer's technical documentation, dostupný z www.abb.com
- [23] Shunt Reactors, MITSUBISHI-ElectricPower Products, Manufacturer's technical documentation, dostupný z www.meppi.com
- [24] Shunt Reactors ,VA TECH ELIN Transformatoren, Profile of Products, dostupný z www.vatech.at
- [25] Air Core Reactors, AREVA T&D Ltd. (Nokian Capacitors Ltd), Manufacturer's technical documentation, dostupný z www.areva-td.com
- [26] Air core reactors, Nokian Capacitors Ltd., Manufacturer's technical documentation, dostupný z www.nokiancapacitors.com
- [27] Reactors, Trench, Manufacturer's technical documentation, dostupný z www.trenchgroup.com
- [28] Air Core Reactors, PEC Phoenix Electric Corporation, dostupný z www.phoenixelectric-usa.com
- [29] HILKAR Electric Ltd., Sakarya, Manufacturer's technical documentation, dostupný na <http://www.hilkar.com>
- [30] SIDAC reactors and filters, Siemens AG, Automation and Drives, dostupný na www.automation.siemens.com
- [31] Line Reactors and AC Drives, Rockwell Automation, 2006, Pub. No. DRIVES-WP016A-EN-P, dostupný z www.rockwellautomation.com
- [32] Line Traps Air core, dry type Up to 800 kV, AREVA T&D, www.areva-td.com, Manufacturer's technical documentation, www.areva-td.com
- [33] Line Traps , Trench, Manufacturer's technical documentation, dostupný z www.trenchgroup.com
- [34] Static Var Compensator (SVC),Nokian Capacitors Ltd. Industrial, Manufacturer's technical documentation, dostupný z www.nokiancapacitors.com
- [35] Arc Suppression Coils, EGE ČeskéBudějovice - Technický materiál, dostupný z www.ege.cz

- [36] ČSN IEC 353 Závěrné tlumivky pro elektrické střídavé sítě
- [37] High Voltage Direct Current Transmission – Proven Technology for Power Exchange – Siemens, technical documentation, dostupný z www.siemens.com/hvdc
- [38] Power Factor Corection, Nokian Capacitors Ltd., Manufacturer's technical documentation, dostupný z www.nokiancapacitors.com
- [39] Harmonics and Reactive Power Compensation in Practice, Nokian Capacitors Ltd., Manufacturer's technical documentation, dostupný z www.nokiancapacitors.com