

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Ing. Petr Dohnal

Vliv magnetického pole na plazma elektrického oblouku

Influence of magnetic field to electrical arc plasma

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor : Silnoproudá elektrotechnika a elektronika.
Školitel : Prof. RNDr. Vladimír Aubrecht, CSc.
Oponenti : Prof. RNDr. Vratislav Kapička, DrSc. MU Brno
Ing. Jan Krejčí O EZ s.r.o.
Datum obhajoby : 15.prosince 2004

Klíčová slova : Jistič nízkého napětí, Plazma
elektrického oblouku, Magnetické pole ...

Keywords : Low Voltage Circuit breaker,
Electric arc plasma, Magnetic Field ...

Práce je uložena na vědeckém oddělení UVEE FEKT VUT Brno.

Preambule

Tato práce vznikla v těsné spolupráci UVEE FEKT VUT v Brně a OEZ s.r.o. na základě dlouhodobých kontaktů v oblasti výzkumu a vývoje přístrojů nízkého napětí.

Podmínky pro tuto práci vznikaly postupně díky vědeckým, výzkumným a vývojovým záměrům, jak na UVEE tak zejména podniku OEZ s.r.o.

Teoretické podklady a výsledky jsou prací UVEE, ale bez účinné materiální a fyzické podpory OEZ s.r.o. by byly samoúčelnými. S ohledem na skutečnost, že práce vznikla na konkrétních přístrojích sortimentu OEZ, se souhlasem k určení geometrických, materiálových a jiných parametrů, se stala tato práce předmětem utajovaných skutečností. Výsledky v obecné podobě jsou publikovatelné pouze se souhlasem OEZ s.r.o. Z tohoto důvodu také v popisu konkrétních modelů zhášecích komor a jejich ověřování nejsou uváděny konkrétní údaje.

Práce vznikla v rámci řešení projektu GAČR 102/04/2090 „Vliv vnějších polí na plazma elektrického oblouku“

© Petr Dohnal, 2005

ISBN 80-214-2842-2

ISSN 1213-4198

VĚNOVÁNO RODINĚ

Obsah

1 Úvod	5
1.1 Podobné projekty v EU	5
1.2 Cíle práce	6
2 Jistič	7
2.1 Spoušť	7
2.2 Funkce zhášecí komory	9
2.3 Funkce proudovodné dráhy	9
2.4 Význam termodynamických procesů	10
3 Modelování zhášecího procesu	11
3.1 Základní rovnice	12
3.2 Postup výpočtu	13
4 Zjednodušené výpočty sil	15
4.1 Výpočet vtahovací síly plátů komor	15
4.2 Výpočet síly v závislosti na tvaru komor	17
4.3 Výpočet elektrodynamických sil kontaktu	18
5 Měření	20
5.1 Popis experimentu	20
5.2 Experiment	21
5.3 Vyhodnocení měření	22
5.3.1 Makroskopický pohled na výsledky	22
5.4 Vyhodnocení pohybu kontaktů	23
5.4.1 Vyhodnocení pohybu kontaktů a obloukového napětí	24
5.5 Vyhodnocení plechů komor	25
5.6 Zhodnocení měření	26
6 Závěr	27

Kapitola 1

Úvod

Spolupráce průmyslu se školami má zvláště v dnešní době veliký význam. Nejdůležitějším úkolem vysokých škol technického směru je zajistit pro průmysl dostatek kvalitních odborníků, vzdělaných nejen v daném specializovaném oboru. Škola musí těmto budoucím pracovníkům nabídnout i širší spektrum vědomostí z různých příbuzných oborů. Jen takový pracovník je schopný spolupracovat na úkolech v týmu odborníků dané firmy. Do spolupráce zapojuje jak svoji specializaci, tak je schopen formulovat jednotlivé problémové úkoly pro ostatní spolupracovníky, pracujícím v jednom týmu. Díky této spolupráci mají podniky možnost připravit odborníky podle svých požadavků. Mohou se spolupodílet na vybavení laboratoří, mohou poskytovat studentům pomoc ve formě různých úkolů, výpomocí nebo brigád, kdy studenti přicházejí do přímého styku s výrobními technologiemi, mají také možnost poznat „na vlastní kůži“ funkci konstrukčních kanceláří a jejich vybavení, ať už se jedná o konstrukci, výrobu, nebo marketing.

1.1 Podobné projekty v EU

Technische Universität Braunschweig (D)

Profesor Manfred Lindmayer a jeho spolupracovníci vypracovali systém, který je používán při výpočtech a simulaci chování elektrického oblouku v komoře zhašecích systémů. Postup vychází z možností daných výpočetní technikou, prochází a ověřuje jednotlivé kroky analýzy elektrického oblouku prováděné

pomocí numerických metod. Literatura : [1]

Firma Moeller (D)

Firma Moeller vychází ze zkušeností, které má s návrhem elektrických přístrojů v oblasti nízkého napětí. Veliké zkušenosti má zejména v oblasti návrhu komory a tlaku, uvnitř komory pro účinné budování obloukového napětí a proudu. Jejich numerický model elektrického oblouku uvnitř komory vychází z podobného modelu jako u prof. Lindmayera z TU v Braunschveigu. V technickém řešení zhašení oblouku se objevuje systém dvakrát přerušené kontaktní dráhy u přístrojů s vyšší vypínací schopností, systémy odvádění zplodin hoření oblouku kanálky do prostoru za jističem, dobře vyřešené tlakové poměry při zhašení oblouku uvnitř komory. Literatura : [2]

1.2 Cíle práce

Cíl práce je vytyčit směr výzkumu v oblasti modelování chování a vlivu magnetického pole na oblouk elektrického proudu. V rámci práce jsou uskutečněny a dokončeny tyto kroky, potřebné pro sestavení a validaci vhodného numerického modelu elektrického oblouku :

- sestavení parametrického modelu pro modelování pomocí vhodné numerické metody s přechodem mezi jednotlivými kroky výpočtu.
- návrh a realizace měření chování oblouku elektrického proudu v modelu jističe nízkého napětí.
- vyhodnocení měření a porovnání s teoretickými předpoklady.

Mimo tyto body jsou v práci obsaženy výpočty, které byly provedeny jako krok pro ověřování správnosti postupu navrženého modelu a ověřování funkčnosti modelu výpočtu magnetického pole.

- Výpočet tvaru vtažovací síly v závislosti na tvaru komory a proudu oblouku
- Výpočet závislosti elektrodynamické síly působící na kontakt v zavřeném stavu

Kapitola 2

Jistič

Silnoprúdové obvody lze ovládat a současně zajišťovat před nežádoucími účinky nadprúdu a zkratů samočinnými vypínači nebo také jističi. Samočinný vypínač slučuje funkci vypínače s funkcí ochranného prvku obvodu. Obvyčejně se jedná o přístroj s výkonovým zhašecím systémem přizpůsobeným pro vypínání velikých prúdu, $I = (20 \div 250)$ násobku jmenovitého prúdu. Kontaktní systém je ovládán systémem mechanismu zakloubených pák a volnoběžky, které mají za úkol zesílit signál spouště a způsobit rychlé vypnutí jističe při poruše. Vypnutí jističe je dynamický stav jističe, kdy jeho mechanická soustava po popudu spouště oddálí kontakty, čímž přeruší kontaktní styk a zahájí proces zhašení oblouku, který končí v okamžiku, kdy se přeruší vodivá cesta hořícího oblouku a dojde k obnovení elektrické pevnosti mezi vypnutými kontakty.

2.1 Spoušť

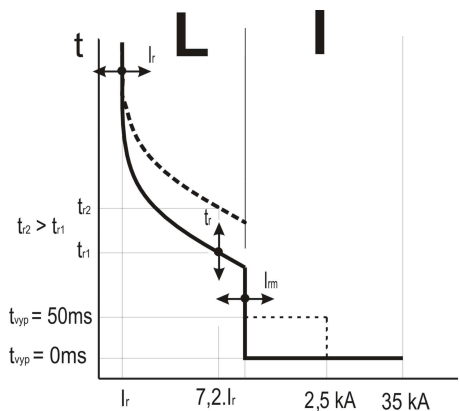
Spoušť jističe je elektromechanický nebo elektronicky ovládaný mechanismus, který při překročení podmínky pro vypnutí, udávané charakteristikou zapůsobí na mechanismus volnoběžky jističe, který provede vypnutí jističe. Spouště jističů lze rozdělit na 3 základní druhy.

- Spouště závislé na prúdu jištěného obvodu
- Spouště závislé na napětí, podpětová a přepětová spoušť, vypínají při malém (velkém) napětí v jištěném obvodu.

- Spouště nezávislé (povelové), vypínají jistič povelom, nezávisle na stavu jištěného obvodu.

Spouště proudově závislé hlídají proud protékající jističem do obvodu. Pokud proud překročí čas udávaný vypínací charakteristikou, spoušť způsobí vypnutí obvodu. Vypínací charakteristikou jističe rozumíme souhrn bodů na charakteristice I-t (viz obrázek 2.1), která určuje, za jaký čas vypne spoušť daný proud. Tvar této charakteristiky je určen povahou a potřebou zařízení, které daný jistič nebo jisticí zařízení chrání. Obecně lze u spouští jističů rozdělit charakteristiku na dvě základní části:

- Časově závislá spoušť (na obrázku 2.1 označena ustáleným označením „L“)
- Časově nezávislá spoušť (označena „I“)



Obrázek 2.1: Vypínací charakteristika spouště jističe

Čas vypnutí daného nadporodu pomocí časově závislé části vypínací charakteristiky je dán součtem dvou časů $t_{vyp} = t_{sp}(I) + t_{kon}$, kde $t_{sp}(I)$ je čas, který určuje charakteristika spouští a t_{kon} je čas za který vypne mechanismus jističe od popudu spouští. Tvar charakteristiky časově závislé spouští zpravidla určuje tepelný charakter jištěného zařízení - proto je možno setkat se s nesprávným označením „tepelná spoušť“. Čas vypnutí časově závislé charakteristiky je konstantní $t_{vyp} = t_{kon} = konst$ pro všechny proudy v intervalu $I \in [I_{rm}, I_{cw}]$,

kde I_{rm} je proud, při kterém začíná reagovat okamžitá spoušť, I_{cw} je maximální proud, který je jistič schopen vypnout. Čas vypnutí t_{kon} bývá zpravidla podle velikosti a konstrukce jističe od $t_{vyp} = 10$ ms (jedna půlperioda průmyslového kmitočtu 50 Hz) do 30 ms u velikých jističů. Malé jističe mají zpravidla reakční dobu mechanismu ještě kratší, aby docházelo k oddálení kontaktů a hoření oblouku už v čase kolem 2-3 milisekund a následkem toho výrazného snížení maximální velikosti proudu a tím i snížení energie, která vnikne do obvodu (omezovací funkce). Časově nezávislá spoušť je konstruována pro ochranu před účinky zkratu vodičů a její nastavení se provádí tak, aby nevypínala jistič (nevypavovala) při dovolených nadproudech.

2.2 Funkce zhášecí komory

Jističe určené pro nízké napětí do cca 1000 V a některé typy stejnosměrných rychlovypínačů pro ochranu měření pro napájení trakčního vedení např. tramvajových drah jsou konstruovány jako tzv. kovové roštové komory nazývané též deionová mříž.

Princip funkce tohoto zhášedla umožňuje vypínání pomocí rychlého budování obloukového napětí. Plazma oblouku elektrického proudu mezi oddalujícími se kontakty přinutíme vhodným uspořádáním tvaru kontaktů, komory a přidavných prvků roztrhat na několik obloučků zanedbatelné délky. Jednotlivé obloučky si vybudují přielektrodové napětí, které je různé podle použitého materiálu plechů a prostředí uvnitř komory. Toto prostředí závisí na materiálu kontaktů a materiálu izolačních stěn, se kterými přijde oblouk do styku, které vaporizují (vypařují) do prostředí plynné zplodiny svého hoření. Vhodnou volbou tohoto materiálu je možné poměry uvnitř plazmatického sloupce a tím i jeho vlastnosti změnit.

2.3 Funkce proudovodné dráhy

Jedním ze způsobů, jak navést oblouk do roštů komory je hluboký záhyb proudovodné dráhy, který „pružnou hmotu“ hořícího oblouku bude mít tendenci posouvat směrem „do komory“ pomocí elektrodynamických sil v záhybu proudu. Magnetická síla má snahu vyrovnat proudovodnou dráhu, a „pružné“ prostředí oblouku se této síle podvolí vytvarováním jádra plazmatu do oblouku vhodným směrem. Elektrodynamická síla působí také na pohyblivý kontakt, způsobuje spolu s v úžinovou silou kontaktního styku při spojení kontaktů protiváhu síly

působící na kontaktní styk. Pokud se využije vhodným způsobem této vlastnosti proudovodného záhybu, jistič začne vypínat dříve, než dojde k vypínání mechanismu kontaktů od popudu spouště. Tato vlastnost je ověřena měřením na modelu jističe v kapitole i teoreticky výpočtem v [13] nebo [10].

2.4 Význam termodynamických procesů

V procesu vypínání působí na pohybující se oblouk mimo elektrodynamické síly také síly, které jsou spojeny s transportem plynů uvnitř zhášedla vypínače. Vhodně je tento jev využit například u vypínačů VN s principem zhášení nazývaným self-blast, kde je v akumulacním prostoru při vypínání vlivem vysoké teploty oblouku v čase 10-20 ms od začátku vypínání akumulována tlaková energie, která způsobí rozdíl tlaků v trysce zhášedla a pomůže při vypnutí oblouku rychle vyměnit ionizovaný vodivý plyn.

V prostředí jističe se používá podobný princip pro pohyb oblouku uvnitř zhášedla směrem k plátům zhášecí komory. Tělo oblouku se díky rychlému oteplení chová jako zdroj tlaku, který se snaží uvolnit ve všech směrech ven od středu těla oblouku. V prostoru mezi kontakty se při vhodné volbě objemu prostoru vytvoří tlak, který působí na tělo oblouku aerodynamickou silou a vtlačuje ji do plátů komory. Tlak uvnitř akumulacního prostoru roštové komory podle výpočtů provedených v [2] dosahuje hodnot $p_p = 0,1 \div 0,5$ MPa. Tlaky uvnitř těla plazmatu dosahují tlaku až $p_{arc} = 1$ MPa. Rychlost plynu a tedy i těžkých kladných iontů (N^+, O^+, N^{++}) v blízkosti plazmatu při vypínání se blíží rychlostí zvuku.

Kapitola 3

Modelování zhášecího procesu

Zhášecí proces spojený s hořením elektrického oblouku uvnitř zhášecí komory lze v hrubém rozlišení rozdělit na tři základní intervaly: silnoproudý interval, interakční interval v blízkosti nuly proudu a dielektrický interval, kdy nastává proces obnovení elektrické pevnosti vypínací dráhy mezi kontakty.

Rozdělení na tyto intervaly umožňuje úpravy experimentálních podmínek tak, aby byly studovány dominantní jevy v daném intervalu veličin. To vede ke zjednodušeným modelům elektrického oblouku, kterým je možno vytvořit teoretický popis a pomocí něho vyhodnotit z experimentálního měření studovanou veličinu, respektive naopak řešení systému rovnic plynoucího z teoretického popisu získat kvantitativní údaje o probíhajících jevech.

Interval volného hoření je charakteristický radiálním transportem energie z těla oblouku zářením, vedením a transportem média v radiálním směru. Interval hoření mezi pláty komor je charakterizován přenosem energie v axiálním směru do plátů komor. Rychlost změny tvaru oblouku, změn síťového proudu rychlosti kontaktů, a časové konstanty oteplení jednotlivých částí obvodu jsou malé proti změnám termodynamickým a chemickým v plazmatu (disociace, ionizace), a proto lze zanedbat časové členy disociačních procesů a uvažovat složení plazmatu a parametry plynoucí ze složení plazmatu pouze jako funkce teploty, což vyjadřuje nerovnost naznačená v 3.1, kdy členy t_{chem} a t_{plazma} vyjadřující rychlost chemických změn v plazmatu jsou mnohem menší, než členy, které vyjadřují rychlost změny síťového napětí a proudu t_{site} a rychlost kon-

taktů $t_{kontakt}$

$$t_{chem} \approx t_{plazma} \ll t_{kontakt} \approx t_{site} \quad (3.1)$$

Podmínkou je také kvazineutralita plazmatu daná tzv. Debyeovou délkou, která popisuje vzdálenost, kterou je nutné dodržet při úvahách o plazmatu jako nábojově neutrálním médiu uvnitř komory jističe.

3.1 Základní rovnice

Pro elektrické parametry zadávané z vnějšku numerického modelu jističe je použita rovnice pro obvod s koncentrovanými parametry:

$$u_{zdroje}(t) = Ri + L \frac{di}{dt} + u_{arc}, \quad (3.2)$$

kde napájecí napětí $u_{zdroje}(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$, R je ohmický odpor obvodu a L je indukčnost obvodu zapojeného jističe. Pro vypínací proces je také důležitý úhel sepnutí χ , tedy doba vyjádřená v úhlových stupních sepnutí zkratového obvodu od průchodu průběhu napájecího napětí nulou. u_{arc} je obloukové napětí, které je vypočítáno pomocí *vnitřního* modelu zhášecího systému. U vícefázového systému je nutné vypočítávat hodnoty proudu i každé fáze. Základem vnitřního modelu jsou MHD (Magneto Hydro Dynamické) rovnice plynu popsané rovnicí kontinuity tekutiny. Druhá rovnice vnitřního popisu je momentová rovnice plynu

$$\frac{\partial \rho \vec{v}_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} v_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + R_{vis}(p, T) + \vec{j} \times \vec{B} \quad (3.3)$$

kde v_i je jednotkový vektor rychlosti, x_i jednotkový vektor polohy, $R_{vis} = \nu \Delta \vec{v} + \frac{\nu}{3} \nabla \cdot \nabla \vec{v}$ jsou ztráty, způsobené vazkým třením v tekutině o viskozitě ν a člen $\vec{j} \times \vec{B}$ představuje Lorentzovu sílu způsobenou od hustoty orientovaného proudu $\vec{j} = j \cdot \vec{u}$ a vektoru magnetické indukce \vec{B} . Teplotní potenciál je popsán rovnicí energetické bilance

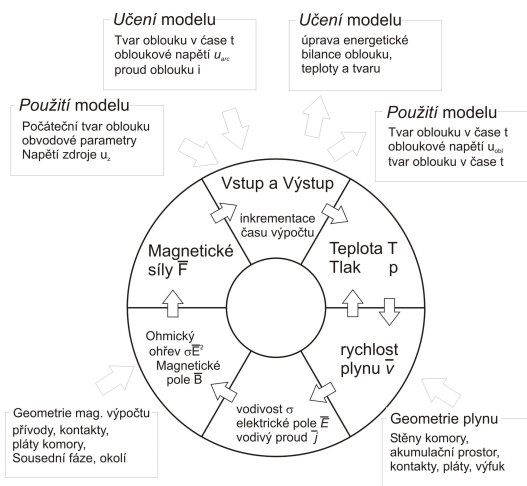
$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho h(p, T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} h(p, T) - \lambda(p, T) \cdot \nabla T) = \\ = \frac{\partial p}{\partial t} + S(p, T, \vec{x}) + \sigma(p, T) E^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

kde člen $\frac{\partial \rho h(p, T)}{\partial t}$ představuje změnu entalpie uvnitř plynu, člen $\nabla \cdot (\rho \vec{v} h_i)$ představuje změnu energie způsobenou prouděním a vedením, člen $\frac{\partial p}{\partial t}$ představuje

energii přeměněnou na mechanickou práci zvýšení tlaku, člen $S(p, T, \vec{x})$ představuje energii získanou zářením, která je vypočítávána pomocí zvláštního modelu. Člen $\sigma(p, T)E^2 = \frac{\vec{j}}{\sigma(p, T)}$ vyjadřuje ohmické teplo získané vedením proudu v prostředí s vodivostí σ . Tyto rovnice spolu s Maxwellovými rovnicemi tvoří soustavu rovnic, která teoreticky popisuje chování vodivé tekutiny, například ionizovaného vzduchu o vysoké teplotě. Výpočet prochází řešením rovnic postupně v pořadí, které je popsáno v následující kapitole.

3.2 Postup výpočtu

Pro výpočet chování plazmatu se řešení polí dle předešlých vztahů používá postup, který lze naznačit jednoduchým schématem. V kruhu schematu se postupuje od sekce **vstup** a **výstup** ve směru šipek. Každá sekce znamená jeden

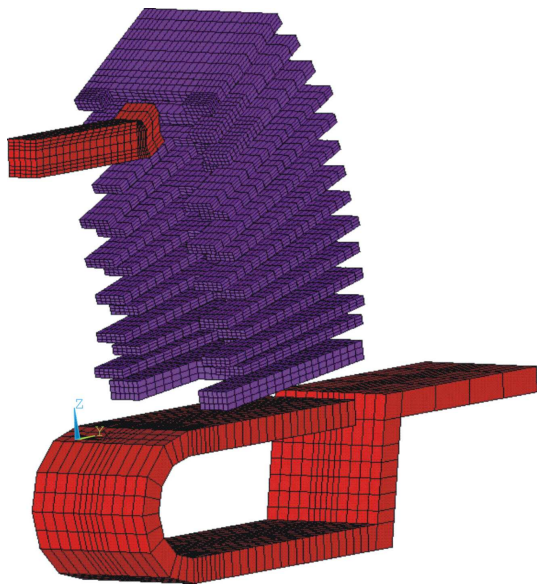


Obrázek 3.1: schéma postupu výpočtu MHD rovnic

krok výpočtu. V rámci jednoho kola výpočtu je vypočítán odhad rozložení termodynamických veličin, teplotního a tlakového pole uvnitř komory. Z rozložení teplotního pole se z funkce vodivosti plynu vypočte rozložení proudu a sil uvnitř jednotlivých elementů od protékajícího vodivého proudu a od pohybu volných nábojů. Při novém startu výpočtu je vypočteno posunutí od silové re-

akce za přírůstek času výpočtu Δt (různí autoři [4],[2] používají velikost kroku $\Delta t = (0,1 - 1) \mu s$. Tento výpočet je nutné pro správnou funkci „naučit“ z dat získaných experimentálně na známém modelu. To je velmi náročná práce.

Protože se jedná o přechod mezi několika disciplínami výpočtu polí, je nutné vybudovat model tak, aby geometrie a indexování polí byla co nejjednodušší pro použití vyhovujících prvků pro všechny druhy analýzy. Tomuto vyhovuje nejlépe šestiboký hranol, který lze použít jak v elektrické a magnetické analýze, tak i v prostředí, které je určeno pro výpočet pole tlaku a rychlostí. V rámci práce byl podle těchto požadavků vytvořen zjednodušený parametrický model pro účely další práce.



Obrázek 3.2: Numerický model zhášecího systému

Kapitola 4

Zjednodušené výpočty sil

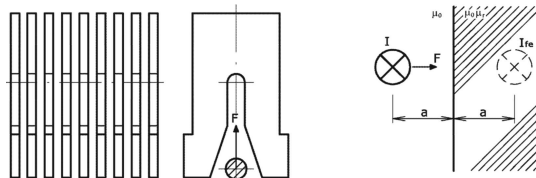
Disertační práce se v praktické části zabývá otázkou vlivu magnetického pole na plazma oblouku elektrického proudu. Vyšetřuje sílu na oblouk uvnitř zhašedla jističe nízkého napětí. Postupně byly prováděny výpočty a měření, které jsou zde prezentovány.

- výpočet vtahovací síly ferromagnetické komory podle tvaru komory
- výpočet síly působící při vypínání na sepnutý kontakt modelu

4.1 Výpočet vtahovací síly plátů komor

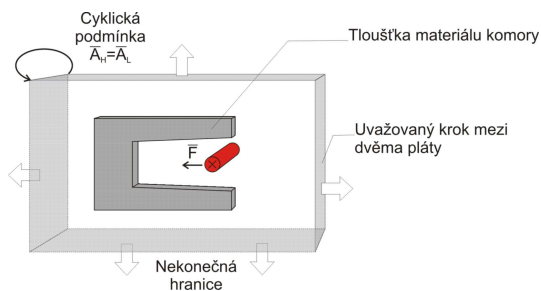
Vtahovací síla komory je síla způsobená silou na proudový vodič v blízkosti feromagnetika. Analyticky je tuto sílu možné odvodit pomocí principu zrcadlového vodiče o velikosti proudu $I_{Fe} = \frac{\mu-1}{\mu+1} \cdot I$ (viz obr. 4.1), kde I je proud vodiče který vyvolává danou sílu a I_{Fe} je ekvivalentní proud obrazu vodiče v komoře, μ je permeabilita feromagnetika. Odtud lze pro sílu u stěny odvodit vztah pro sílu dvou vodičů dlouhých l ve vzdálenosti $2a$ protékajících proudy I a I_{Fe} ve stejném směru

Plech komory se vyrábí z magnetické oceli z plechů o určité tloušťce. Tyto plechy jsou skládány do roštu, postupně nad sebe, buď zcela paralelně, nebo pouze s malým úhlem mezi jednotlivými plechy. Pokud je pro jednoduchost zanedbáno okolní pole od proudu vodičů a nahrazeno pouze nekonečným prostorem, lze pro výpočet vtahovací síly použít jednoduchý model jednoho plechu,



Obrázek 4.1: Vtahovací síla v blízkosti ferromagnetika

kde počet plechů komory lze při teoreticky nekonečném počtu komor nahradit cyklickou podmínkou, která přenáší hodnotu vypočítávaného vektoru na stěnách modelu na protilehlou stranu. Pokud je uvažována osová nesymetrie a plechy jsou skládány nad sebou například po střídáných dvojicích, je nutné modelovat tuto dvojici. Výsledná síla je udávána v jednotkách síly na jeden plát komory. Při výpočtu síly je nutné si uvědomit, že plech komory je vodičným prostředím, a změna magnetického toku průřezem plátu v něm vyvolává vířivé proudy, které mohou oslabovat výsledné magnetické pole.



Obrázek 4.2: Geometrie modelu výpočtu vťahovací síly komor

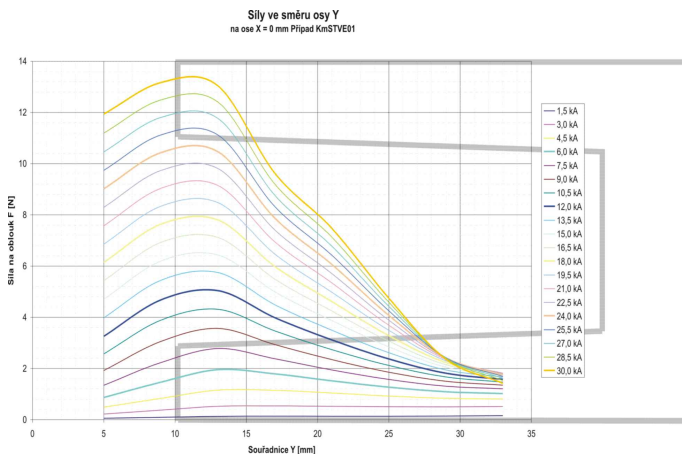
Pro výpočet síly programem ANSYS byla díky rychlejšímu výpočtu a konvergenci zvolena metoda vektorového potenciálu. Použitý prvek MKP ANSYS : šestiboký hranol **SOLID97** se 4 stupni volnosti AX,AY,AZ a VOLT. Počet prvků při daném dělení cca 100 000. při dělení komory na 5 vrstev prvků, dělení vzduchové mezery na 3 prvky, ostatní dělení je zvoleno tak, aby stěna prvku komory nebyla delší než 1 mm.

Při výpočtu bylo nutné uvážit, zda je nutné zahrnout do výpočtu vířivé

proudy. Výpočet na základním tvaru komory byla vypočtena odchylka 2% mezi výpočtem s uvažováním vířivých proudů a výpočtem, ve kterém byly vířivé proudy zanedbány. Výpočet s uvažováním vířivého proudu byl také mnohem náročnější na čas výpočetního systému. Proto byly další výpočty prováděny jako statické.

4.2 Výpočet síly v závislosti na tvaru komor

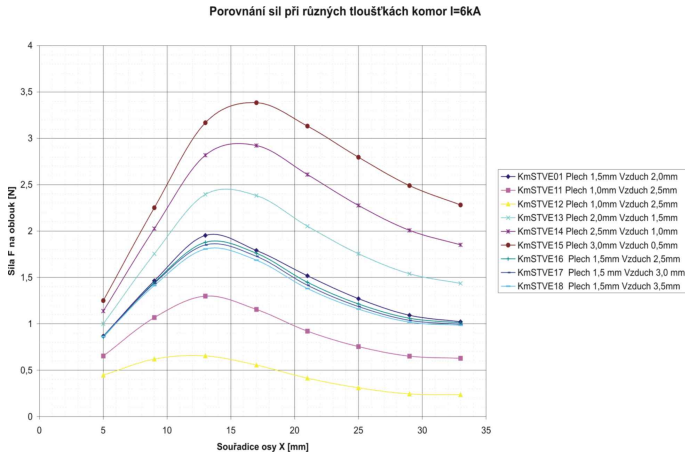
V rámci disertační práce byly vypočítány křivky, které přibližně aproximují vtažovací sílu působící na tělo oblouku ve výšce plechu komory. Tyto křivky jsou vypočteny pro různé tvary komory. Pro každý tvar komory byly vypočtené síly zahrnuty do tabulky a byl vypracován graf, který přibližuje danou závislost síly na poloze oblouku vzhledem k plechu komory. Ukázka křivek je na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Křivky vtažovacích sil

Jednotlivé křivky představují sílu v daném bodě při konstantním proudu. Na osu X se vynáší uvažovaná hloubka vniku těla oblouku do komory. V grafu je též zakreslena šedá silueta komory souhlasně s měřítkem daného grafu, aby se bylo možno lépe orientovat v daném grafu. V následujícím grafu na obrázku 4.4 je znázorněna změna vtažovací síly při proudu oblouku 12 kA při změně

tloušťky komor se zachováním roztečí plechů komory.



Obrázek 4.4: Porovnání vtažovacích sil při změně tloušťky komory

Z výsledků tohoto srovnání je například patrné, že pokud se zvětší tloušťka plechu, zvýší se přibližně přímo úměrně i vtažovací síla. S posunutím proudodvodné dráhy směrem dovnitř komory se přesycuje dolní část komory, a síla klesá. Klesání síly je způsobeno také zápornou silou, kterou působí přední části plechu komory - „nohy“. Změnu tvaru křivky je možno dosáhnout změnou tvaru komory. Například úpravou tvaru na tvar „V“ je dosaženo zploštění tvaru křivky vtažovací síly a zároveň posunutí maxima síly směrem do komory.

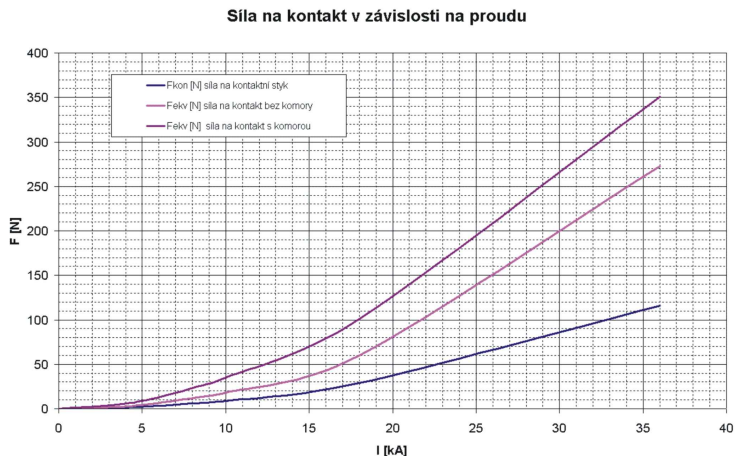
4.3 Výpočet elektrodynamických sil kontaktu

Tento výpočet byl prováděn jako součást diplomové práce, při které autor pomáhal jako odborný konzultant (viz [13]). Se svolením autora diplomové práce je část výsledků prezentována i zde, zejména protože tento výpočet je ověřován při měření, které je popsáno v následující kapitole. Model jističe, má schopnost tzv. elektrodynamického odtrhu kontaktů při zkratu při proudu vyšším, než je $I_p \approx 3 \text{ kA}$. Elektrodynamické síly způsobí nadskok kontaktů a začnou vypínat zkrat dříve, než spouští jističe. Působící síla způsobí nadskok kontaktu a případně jeho zajištění v rozepnuté poloze.

Síla, která působí na uzavřený kontakt je tvořena dvěma složkami :

- Síla působící na elektrický proud \vec{J} , tekoucí kontaktem v interakci s magnetickým polem \vec{B} .
- Síla, působící na proudovou úžinu kontaktního styku.

Výpočtem byly stanoveny křivky sil. Na následujícím grafu jsou vyneseny tři křivky, které z vypočtených bodů aproximují velikost síly na kontaktní styk (nejnižší křivka), velikost síly na kontakt, přepočtenou na místo kontaktního styku bez ferromagnetických plátů komor (prostřední křivka) a sílu na kontaktní styk s ferromagnetickými pláty (vrchní křivka).



Obrázek 4.5: Síla F_{ekv} v závislosti na velikosti proudu kontaktního systému

Aby bylo možno vypočítat sílu na pohybující se kontakt je nutné znát přibližný tvar oblouku, respektive rozložení proudu \vec{J} v prostředí zhášecí komory, kterou lze získat pomocí experimentu nebo pomocí výpočtu z naučeného modelu.

Kapitola 5

Měření

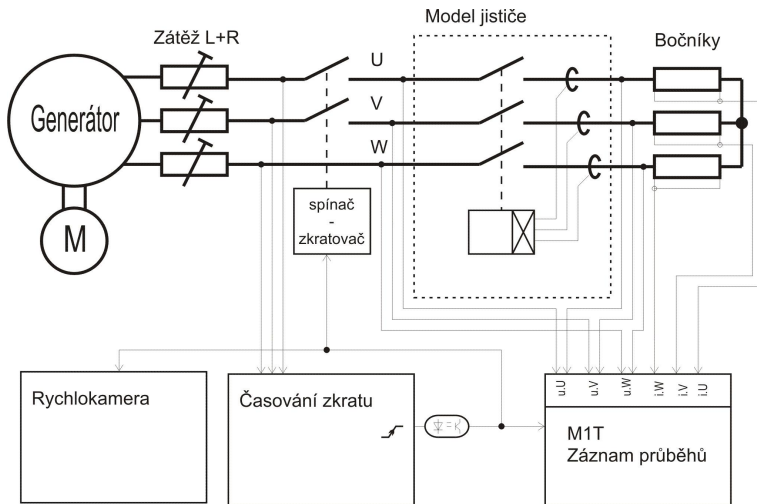
K učení a validaci vytvářeného numerického modelu, bylo navrženo a provedeno měření. Měření probíhalo na zkratovně podniku OEZ s.r.o.

Zkratovnou rozumíme pracoviště vybavené zdrojem zkratového proudu s přístroji pro ovládání experimentu (rychlazkratovače a rychlovypínače), souborem zátěží, kterými se nastavuje proud I a $\cos \varphi$ obvodu. V neposlední řadě je pracoviště vybaveno měřícím systémem pro záznam a zpracování signálů elektrických veličin při zkratu. Schéma zkratovny ukazuje obrázek 5.1

5.1 Popis experimentu

Pro experiment byl využit model, který vychází ze skutečného jističe. Ve spolupráci s konstrukční kanceláří byl model upraven pro sledování oblouku pomocí metod optické diagnostiky průzorem u zhášecí komory pólu fáze W. Tento průzor byl zakryt průhlednou plexisklovou destičkou a důkladně utěsněn tak, aby nedocházelo k úniku plynu z komory jiným směrem, než výfukovými otvory. Aby bylo možno zaznamenat vliv magnetického pole na oblouk elektrického proudu, bylo vyrobeno 9 variant komor s kombinacemi plátů z oceli třídy ČSN 11 373 a nerezové chrom-niklové oceli třídy ČSN 19 663 s permeabilitou μ přibližně rovnou permeabilitě vzduchu. Tyto varianty byly postupně označeny čísly, které jsou v následujícím textu nazývány *typ komory*.

Snímání a vyhodnocení elektrických veličin bylo svěřeno vzhledem ke zkušenostem a vybavení měřícího pracoviště personálu zkratovny. Měřícím přístrojem byl oscilograf pro záznam přechodových dějů MIT firmy Metra Blansko.



Obrázek 5.1: Schéma zkratovny

Proud byl snímán pomocí bezindukčního bočníku, taktéž ve vybavení měřícího pracoviště. Optická diagnostika byla prováděna pomocí digitální rychlostní kamery Olympus I-speed, která byla synchronizována se signálem měřícího pracoviště, aby bylo možno prohlížet současně záznam elektrických veličin a záznam rychlokamery. Po experimentu byl vypracován program SpeedView, který dokáže mimo jiné tyto záznamy prohlížet a zpracovávat.

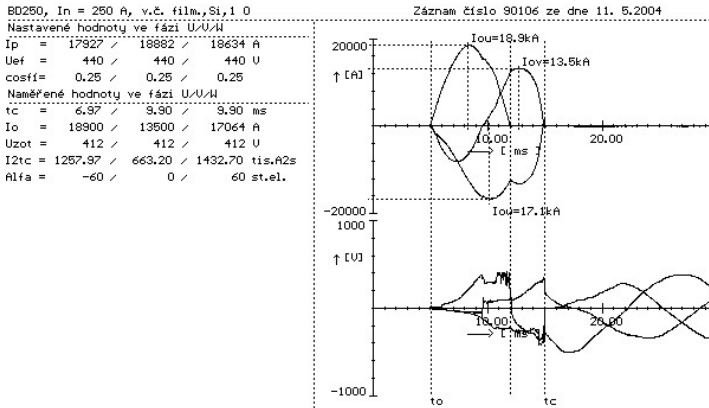
5.2 Experiment

Pro testy byly vybrány tyto předpokládané ustálené proudy I_p v obvodu : 3kA, 5kA, 18kA a 30kA. Pro všechny případy zkratu byl zvolen okamžik zapnutí $\alpha = 0$ ve fázi W. Účinník $\cos\varphi$ pro jednotlivé případy zkratového proudu je uveden v tabulce 5.2. Jeho velikost je dána použitou zátěží, která byla k dispozici na zkratovně.

Záznam z měřící soustavy se přenáší a zpracovává pomocí vlastního software zkratovny. Výsledkem jsou zobrazené průběhy ve formě časových průběhů proudu a napětí během zkoušky. Tento záznam je vidět na obrázku 5.2

I_p	$\cos\varphi$
3 kA	0,91
5 kA	0,69
18 kA	0,25
29 kA	0,19

Tabulka 5.1: Předpokládané proudy a účinník



Obrázek 5.2: Záznam zkratovny (grafický výstup)

5.3 Vyhodnocení měření

Z hodnot, které jsou k dispozici přímo z programu zkratovny, lze usuzovat na vlastnosti jednotlivých typů komor. Již z této charakteristiky však lze odvozovat, jaký mají vliv různé magnetické poměry uvnitř komory.

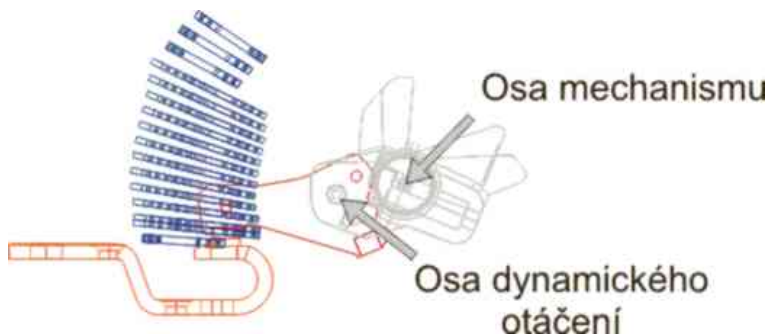
5.3.1 Makroskopický pohled na výsledky

Pro makroskopické vyhodnocení použijeme charakteristické hodnoty proudu při stejném nastavení hodnot zkratu. Těmito hodnotami jsou maximální omezený proud dané fáze I_o a prošlý celkový jouleův integrál I^2t . Oba tyto parametry jsou velmi důležité při rozhodování o kvalitě zhášecího systému.

5.4 Vyhodnocení pohybu kontaktů

Pro modelování oblouku je důležitý pohyb a poloha kontaktu, který tvoří přechod z prostředí tvořeného plazmatem do prostředí s podmínkami vedení proudu ve vodiči a bude sloužit jako okrajová podmínka geometrie teoretického výpočtu.

Kontakt je v modelu uchycen na dvou osách. Obě osy umožňují otáčivý pohyb kontaktu směrem od kontaktního styku. První osa je nazývána statickou nebo také mechanickou osou otáčení. Podle této osy se kontakty otáčejí při ovládání pomocí mechanismu jističe. Druhá osa otáčení se nazývá dynamická. Kontakty se otáčejí okolo této osy v případě, že předpokládaný proud dosáhne velikosti proudu nad 3kA. Potom elektrodynamická síla kontaktního styku spolu se silou působící na celý kontakt, přemůže systém pružiny působící na vačku, tvořenou částí kontaktu a rozepne kontaktní dráhu dříve, než ji začne vybavovat mechanismus pevného kontaktu. Tento způsob urychluje vypínání pomocí rychlejšího budování obloukového napětí u_o a omezit nárůst proudu a velikost prošlé energie, než by tomu bylo při vypínání pomocí mechanismu.



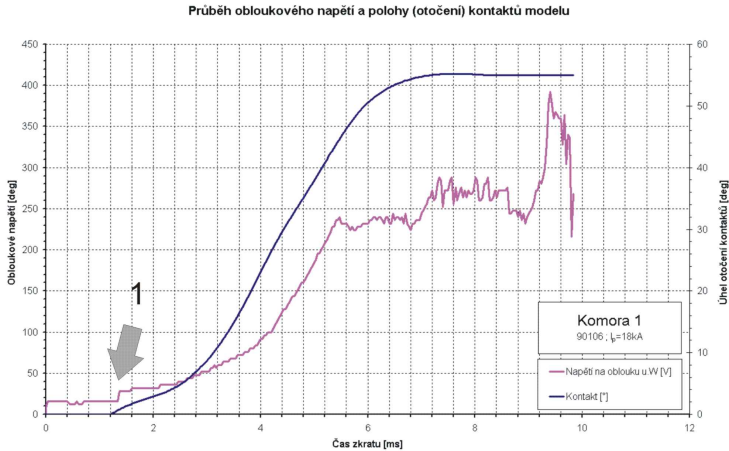
Obrázek 5.3: Osy otáčení modelu

Vzhledem k systému dvou os je těžké použít systému, který by byl schopen snímat polohu nebo natočení systému, například tahový nebo otočný potenciometr. K snazšímu vyhodnocení pohybu kontaktů byl vytvořen modul programu SpeedView, který polohu kontaktu vykresluje do kalibrovaného záznamu optické diagnostiky a umožňuje tak odečíst polohu kontaktu v daném čase. Program má vloženy parametry obou středů otáčení modelu, mezi kterými volí obsluha programu. Odečtené body jsou vyneseny do grafu, proloženy splajnem tak, aby

bylo možno sledovat i spojité křivky veličin odvozených - rotační rychlosti \vec{v}_k a rotační zrychlení \vec{a}_k .

5.4.1 Vyhodnocení pohybu kontaktů a obloukového napětí

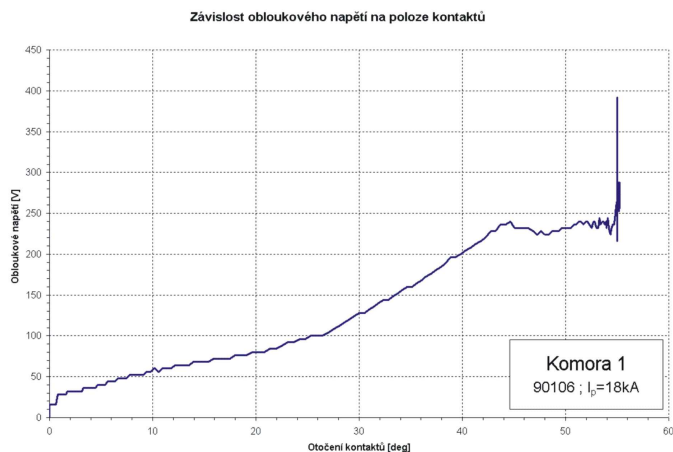
Osu, kolem které se kontakty budou otáčet, lze odvodit od předpokládaného proudu zkratu. Pro zkratové proudy $I_p < 3$ kA lze dráhu kontaktů, vzhledem k malé elektrodynamické síle, odvozovat od otáčení pouze kolem osy statického otáčení. Pro zkraty v rozmezí $I_p \in (3 \text{ kA}, 5 \text{ kA})$ je nutné uvažovat průběh vypínání s otáčením kolem obou os. Otáčení kolem statické osy vzhledem k pohonu pružinou a velkým setrvačným hmotám lze považovat za konstantní v celém rozsahu proudů. V případě proudu $I_p > 5$ kA je možno uvažovat pouze pohyb kolem dynamické osy, protože kontakt dosáhne horní polohy dříve, než začne vypínat mechanismus. V horní poloze se kontakt vrátí do původní zakloubené polohy vačky, aby bylo možno po zapnutí jističe opět dosaženo kontaktní síly.



Obrázek 5.4: Ukázka grafu pohybu kontaktů a obloukového napětí

V záznamu je kalibrován start otáčení kontaktů u prvního nadskočení kontaktů (viz šipka 1 v grafu na obrázku 5.4) kde se k úbytku napětí na impedanci kontaktní dráhy přidává obloukové napětí. Během několika desítek

mikrosekund (dva až tři snímky rychlokamery) se v záznamu objevují první viditelné záblesky, svědčící o pohybu kontaktu. Odčtené kalibrované body záznamu pohybu kontaktu jsou proloženy splajnem. Se zvětšováním vzdálenosti mezi kontakty úměrně stoupá napětí oblouku podle toho, jak rychle přechází do plátů komory a tvoří dvojice patkových napětí. Porovnání polohy kontaktu a obloukového napětí je provedeno v grafu na obrázku 5.5. Z těchto obrázků je v posuzován průběh vypínání zhášecího systému.



Obrázek 5.5: Ukázka grafu pohybu kontaktů v závislosti na obloukovém napětí

5.5 Vyhodnocení plechů komor

Z plechů komor po zkratových zkouškách, je možné odvodit pohyb oblouku po plechu ve směry osy X, ve které je obtížné proveditelné snímání rychlokamerou. Na plechu se objevují čtyři základní druhy poškození související s vypínacím procesem. Těmito poškozeními jsou:

- Pokrytí roztaveným kovem (Plazmatické tavení)
- Stopy tavení obloukem (Eroze)
- Katodové a anodové skvrny

- Kuličky kovu (můstkové spojení)

5.6 Zhodnocení měření

Z chování oblouku při vypínání v jednotlivých typech komor je možné odvodit, že magnetické vlastnosti plátů komory mají značný vliv na chování oblouku při vypínání. Oblouk je ve všech případech zkratů $I_p = 18\text{kA}$ a 30kA silou v ohybu kontaktu tlačěn do prostoru před komory a z poškození komor je zřejmé, že jej tlak uvnitř komory vzniklý ohřevem plynu a magnetické síly komor vtahují na plechy. Oblouk je do komory vtlačován, ale k vytvoření podmínek pro jeho roztržení dochází pouze u magneticky vodivých plátů. Pláty z nemagnetické oceli nesou stopy silné eroze přední části, přilehlé k oblouku, kde je oblouk taval a natavený materiál byl protlačován tlakem plynu a usazován na chladné části komor, nebo vstupoval ve formě plynného skupenství do plynu oblouku.

Měření s použitím průhledných průzorů umožňuje získat tvar oblouku při zhášení, potřebných pro tvorbu a učení modelu. Pro zkoumání vlivu elektrodynamických sil na oblouk bude možné tato data použít přímo pro vložení do geometrie výpočtu s použitím metody konstantní proudové hustoty s dostatečnou vypovídací schopností na „vzdálenou“ kontaktní dráhu. Z vyhodnocení měření lze usoudit, že nejlepší komory pro zhášení jsou komora typu 1 vyrobená pouze z ferromagnetických plechů a komora 8 s diamagnetickými plechy ve vrchní části. Komora 8 vykazuje lepší vlastnosti při nižších proudech, při předpokládaném proudu $I_p = 30\text{ kA}$ má shodnou prošlou energii I^2t i vlastní energii zhášení $\int u_o \cdot i_o dt$. Ostatní komory mají tyto ukazatele vyšší, díky nižšímu obloukovému napětí se prodlužuje okamžik nuly proudu a snižuje se i omezení proudu. Nejhorší v tomto směru je zcela nemagnetická komora.

Z vyhodnocení proudu a času nadskoku kontaktu je vidět dobrá shoda s výpočtem provedeným v předchozí kapitole. Při vyšších zkratech přichází do úvahy také moment setrvačnosti kontaktu, který byl ve výpočtech elektrodynamického nadskoku kontaktu zanedbán.

Kapitola 6

Závěr

Tato práce se zabývá návrhem modelu zhášecího systému jističe nízkého napětí a praktickými zkouškami, které budou sloužit jako výchozí podmínky pro učení numerického modelu zhášecí komory. Jako součást práce byly vypočteny hodnoty vtažovacích sil pro různé tvary komor, které by měly sloužit jako příručka pro návrh komor. Měření popsané v kapitole 5 pomáhá ověřit již provedené výpočty z kapitoly 4 a bude sloužit jako okrajová podmínka pro výpočty, které teprve budou prováděny v dalších krocích výpočtu. Provedená srovnání jednotlivých typů komor, které tvoří velkou část práce je přímo použitelné jako metodika pro posuzování kvality navrženého systému zhášecích komor.

Výpočty vtažovacích sil komor mají prakticky pouze informativní charakter, protože jsou postaveny na zjednodušujících předpokladech. Na magnetické pole v okolí komor působí také pole sousedních pólů jističe a přírodní vodiče a kontakty vlastního pólu. Tato pole mají nezanedbatelný vliv na chování sloupce oblouku elektrického proudu, jak bylo zjištěno a popsáno při praktických zkouškách v kapitole 5. Přesto provedené analýzy poskytují zajímavá srovnání vhodnosti daných tvarů zhášecích komor pro návrh jejich plátů.

Výpočty síly sepnutých kontaktů jsou ověřeny pomocí okamžiku nadskočení kontaktů při měření, porovnáním proudu, při kterém u pohyblivého kontaktu dochází k prvnímu nadskočení vlivem elektodynamické síly od procházejícího proudu odpovídá teoretickým předpokladům výpočtu s železnou komorou z ferromagnetického materiálu a s komorou vyrobenou z diamagnetického materiálu s vlastnostmi vzduchu. Odchyly při měření s $I_p = 18$ kA jsou způsobeny opakovaným použitím kontaktního systému pro druhou zkoušku, při které se vlivem eroze kontaktů změnila předpokládaná proudová úžina. Zároveň je ově-

řen předpoklad, že po začátku hoření oblouku jsou nové a částečně poškozené kontaktní systémy prakticky rovnocenné, protože rozhoduje tvar celé dráhy kontaktního systému přilehlého ke sloupci oblouku.

Další práce na sestavení modelu by se měla soustředit na několik základních směrů výzkumu, které lze shrnout do několika bodů:

- Rekonstrukce tvaru oblouku a rozložení teplotního pole plynu v jednotlivých okamžicích hoření oblouku.
- Přenesení tvaru oblouku do numerického modelu. Úprava fyzikálních parametrů jednotlivých analýz modelu pro shodu mezi vypočteným a změřeným krokem výpočtu- „učení modelu“.
- Měření a ověřování tlakových poměrů při hoření oblouku pomocí tlakových sond pro ověření a učení modelu proudění plynu uvnitř komory, měření množství plynu proteklého výfukem.
- Měření, rozbor a ověření magnetického pole v okolí jističe při vypínání pomocí hallových sond.
- Rozbor složení plynu uvnitř zhášedla. Metalurgický rozbor eroze a komor.

Tato práce je významným krokem při řešení úkolu modelování chování elektrického oblouku. Pro praxi jsou přímo použitelné výsledky analýz nadskočení kontaktů a tvary vtahovacích sil komor. Také navržený pokus přinesl nepatrné vylepšení zhášecí komory při zachování stávající geometrii modelu. Příspěvkem pro praktické využití je program, který byl napsán pro vyhodnocování měření a může sloužit jak pro vyhodnocení dějů v modelu jističe, tak pro jiné účely, kde je nutné vyhodnocovat záznamy rychlokamery a osciloskopického záznamu.

Na tuto práci budou v budoucnu navazovat další výzkumy, které budou sloužit pro potřeby výzkumných a vývojových prací. Výsledkem bude model chování plazmatu elektrického oblouku, který „dokáže odhadnout“ chování plazmatu uvnitř navržené geometrie, bez nutnosti fyzického vytváření a ověřování funkčního vzoru. Model tak bude sloužit ke zrychlení návrhu zhášecího systému.

Literatura

- [1] LINDMAYER, M. et al. : Low-Voltage switching arcs - experiments and modelling. XV^{th} Symposium on Physics of Switching Arc, Invited papers, ISBN 80-214-2307-2.
- [2] ANHEUSER, M. et al. : Arc simulation in realistic low-voltage arcing chambers. XV^{th} Symposium on Physics of Switching Arc, Invited papers, ISBN 80-214-2307-2.
- [3] HÜTTNER L., JURÁČKO L., VALENT F. History, development and present state of a miniature circuit breaker XV^{th} Symposium on Physics of Switching Arc, Invited papers, ISBN 80-214-2307-2.
- [4] YAN, J.D. et al. Computer simulation of plasmas in switching and material processing applications XV^{th} Symposium on Physics of Switching Arc, Invited papers, ISBN 80-214-2307-2.
- [5] DĚDEK L., DĚDKOVÁ J. : Elektromagnetismus, skripta FEKT VUT Brno, vydalo VUTIUUM 2000 1. vydání, ISBN 80-214-1106-6
- [6] MELKES, F. Numerické metody v elektrotechnice, učební texty doktorského studia FEKT VUT Brno
- [7] AUBRECHT V. BARTLOVÁ M.: IEEE Trans. on Plasma Science **25** 5 (1997) 815.
- [8] DOHNAL P., AUBRECHT V. Plasmatic pencil, konference IPPT Minsk 2003;
- [9] DOHNAL P. Calculation of Magnetic Force in Low Voltage Circuit Breaker, XV^{th} Symposium on Physics of Switching Arc, Contributed papers, ISBN 80-214-2307-2.
- [10] KAČOR P. : Disertační práce : Numerické řešení elektrodynamických sil na proudovodné dráze spínacího přístroje nn, VŠB Ostrava 2002. + Navazující články na konferencích Ansys user meeting.
- [11] NOVOTNÝ V., VÁVRA Z. Spínací přístroje a rozvaděče na vysoké napětí Praha SNTL/ALFA 1986
- [12] BUL, B.K. a kol. Elektrické přístroje - Základy teorie SNTL Praha 1977
- [13] VALENTA J. Extinguishing Process in Low Voltage Circuit Breakers, Článek na konferenci Student EEICT 2004, Vydavatelstvo STU Bratislava 2004.
- [14] COUFAL, O. Thermophysical properties of the reacting mixture SF_6 and Cu in the range 3 000 to 50 000 K and 0,1-0,2 MPa.

Životopis

Ing. Petr Dohnal

Datum a místo narození:

19.května 1976 v Ústí nad Orlicí

Vzdělání a zaměstnání:

- 1994 Maturita SOUŽ Česká Třebová, obor mechanik silnoproudých zařízení
- 2000 Státní závěrečná zkouška na Ústavu elektrotechniky a elektroniky Fakulty elektrotechniky a informatiky VUT Brno
- 2000 Zaměstnanec OEZ Letohrad s.r.o.
- 2000 Postgraduální studium na Ústavu výkonové elektrotechniky a elektroniky VUT Brno.
- 2003 Zaměstnanec UVEE FEKT VUT Brno, technik laboratoře spínacího oblouku

Vědeckotechnická činnost:

Výzkum v oblasti fyziky spínacího oblouku. Stěžejní částí práce je analýza vlivu magnetického pole na vypínání oblouku ve vypínačích a jističích nízkého napětí s kovovou roštovou zhášecí komorou pomocí metody konečných prvků (MKP) a měření.

Odborná činnost:

Konzultace provozu elektrických strojů a přístrojů v energetických soustavách(1997-2004); Výpočty zkratových proudů v trakčních měnících (1999-2004), ověřování a validace modelu trakční měnirny.

Pedagogická činnost:

Podíl na výuce předmětu Fyzika I, Fyzika II Ústavu fyziky FEKT, Jištění v Silnoproudé elektrotechnice Ústavu výkonové elektrotechniky, Elektromagnetismus Ústavu teoretické elektrotechniky a elektroenergetiky.

Zkušenosti a znalosti :

Práce se základním kancelářským softwarem, programy pro zpracování obrázků a grafů, Prostředky pro kreslení CAD (AutoCAD) a program pro výpočet polí ANSYS (elektrostatika, magnetika, proudění, teplo). Programy pro výpočet dynamických dějů numerickými metodami (Sadys/Dynast/Matlab/Microcap). Základní znalost programování v C/C++ a LabView.

Abstrakt disertační práce

Tato disertační práce řeší problematiku výkonových elektrických přístrojů - jističů nízkého napětí. Zhášení oblouku při vypínacím procesu jističe probíhá vesměs na principu hoření plazmatu uvnitř kovové roštové komory, tzv. deio-nové mříže. Pracovním prostředím ve zhášecí komoře je vzduch. Oblouk je po oddálení kontaktů vtahován do prostoru mezi pláty komor pomocí elektrodynamických sil a mechanismů založených na termodynamických procesech.

V rámci práce byly provedeny výpočty vtažovacích sil ferromagnetických komor, dále potom elektrodynamických sil působících na kontakt při průchodu (zkratového) proudu, potřebné pro odhad omezovací schopnosti modelu jističe. Tyto výpočty byly ověřeny v praktické části pomocí sledování pohybu kontaktu v záznamu rychlostní kamery prováděné na modelu jističe v rámci ověřování schopností a vlastností komory, vyrobené z materiálů v různých kombinacích tak, aby byl ověřen vliv oslabení magnetické indukce působící na tělo oblouku v různých polohách pohybu kontaktu. Toto měření slouží k ověření teoreticky vypočtených hodnot a díky pořízeným záznamům rychlostní kamery i k nastavení modelu, který je popsán v části práce věnované popisu a tvorbě komplexního numerického modelu, připraveném pro účely další práce. V práci jsou určeny další postupy v oblasti učení a použití modelu zhášecího systému výkonových přístrojů nízkého napětí. V praxi je tato práce ověřením schopnosti modelů, který vychází ze skutečného přístroje určeného pro distribuční síť elektrického proudu nn. Navržená metodika ověřování a rozpoznávání polohy kontaktu a tvaru oblouku, která je předmětem navazujících prací, je zpracovávána k automatizaci vyhodnocení měření tak, aby bylo možno analýzu obrazového záznamu z rychlostní kamery provést co nejrychleji s odpovídajícím grafickým a textovým výstupem který bude sloužit jak v technické praxi konstruktérům jističů, tak i pro učení modelu zhášecího systému.

The Abstract of PhD Thesis

This PhD Thesis deals with heavy current electric apparatus - low voltage circuit breakers and arc quenching phenomena. Arc quenching at switch-off process is based on the principle of controlled arc burning inside chamber composed from splitter plates, so-called deion grid. Plasma work gas in the chamber is atmospheric pressure air. After separating of the contacts, the arc is drafted into the splitter plates by means of electrodynamic and thermodynamic forces, which move and stabilize arc inside chamber and helps quickly replace ionized gas between contacts.

The calculation of of ferromagnetic force shape as function of current and arc placement ahead and inside of the chamber plate was performed. Electrodynamic forces acting on the moving contact at short circuit were also analyzed. The theoretical calculations applied on the low voltage circuit breaker were verified by the recordings obtained with high-speed camera. Results of high-speed framing can be also used in design of theoretical models of the circuit breaker. The proposed model reflects real properties of up to date low voltage circuit breaker used in power electrical distribution networks. Designed method of checking and recognition of the contact position and shape of the arc, which would be object of future works, is now automatised to proceed analysis as fast as possible during time after short current circuit tests. The method can be useful for design engineers and for research purposes et all.