



Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Rozbor vypínání velkých proudů při nesymetrických zkratech

Autor práce: Vladimír Vajnar

Vedoucí práce: Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc., Dr.h.c.

Plzeň 2012

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na zhodnocení rozdílných vlivů, kterými síť ovlivňuje vypínač při symetrických a asymetrických zkratech. Rovněž je uvedena vazba s problematikou narušeného vypínání. V úvodní části práce je uveden teoretický rozbor zkratových proudů, elektrického spínacího oblouku a vypínacího procesu, ve druhé části je vyhodnoceno namáhání vypínače při průchodu proudu nulovou hodnotou.

Klíčová slova

Vypínač, asymetrický zkrat, narušené vypínání, namáhání vypínače, zotavené napětí

Abstract

Vajnar, Vladimír. *Analysis of interrupting of great asymmetrical short current [Rozbor vypínání velkých proudů při nesymetrických zkratech]*. Pilsen, 2012. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electromechanics and Power Electronics. Supervisor: Zdeněk Vostracký

Bachelor thesis is focused on the evaluation of different influences affecting circuit-breaker by symmetrical and asymmetrical faults. Also there is a connection with interrupted breaking. In the first part is contained a theoretical analysis of short-circuit currents, the electrical switching arc and breaking process, in the second part is evaluated breaker stressing, while current is passing through zero value.

Keywords

Circuit breaker, asymmetrical fault, interrupted switching, breaker stressing, recovery voltage

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 28. května 2012

Vladimír Vajnar

.....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce Prof. Ing. Zdeňkovi Vostrackému DrSc., Dr.h.c. za cenné rady při zpracování této práce. Rovněž děkuji Ing. Dagmar Kopejtkové a Petrovi Spurnému DiS. ze společnosti ČEPS, a. s. za poskytnutí statistických dat.

Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
Seznam symbolů a zkratk	ix
1 Úvod	1
2 Zkraty - teoretický rozbor	2
2.1 Rozdělení zkratových proudů	2
2.1.1 Symetrický zkrat	2
2.1.2 Asymetrický zkrat	3
2.2 Účinky zkratových proudů	4
2.2.1 Mechanické účinky zkratových proudů	4
2.2.2 Tepelné účinky zkratových proudů	4
2.3 Statistická četnost zkratů v sítích vvn/zvn	5
3 Spínací elektrický oblouk	6
3.1 Vznik spínacího oblouku	6
3.2 Stacionární elektrický oblouk	7
3.3 Dynamický elektrický oblouk	7
3.4 Modely elektrického oblouku	9
3.4.1 Cassieho model oblouku	9
3.4.2 Mayrův model oblouku	10
3.4.3 Kybernetický model oblouku	11
3.4.4 Aplikace modelů oblouku pro vypínací proces	11
4 Vypínací proces - intervaly, zotavené napětí	13
4.1 Silnoproudý interval	13
4.2 Interakční interval	14
4.3 Dielektrický interval	14
4.4 Zotavené napětí	15
4.4.1 PZN při svorkovém zkratu	15

4.4.2	PZN při blízkém zkratu	16
4.4.3	PZN při vypínání malých induktivních a kapacitních proudů	16
4.5	Vypínací schopnost	17
5	Analýza namáhání pro různě velké asymetrie zkratového proudu	18
5.1	Postup práce, definice řešené situace	18
5.2	Derivace proudu a napětí	19
5.2.1	Derivace proudu	19
5.2.2	Strmost zotaveného napětí ze strany vedení	19
5.2.3	Limitní strmost zotaveného napětí ze strany vypínače	20
5.3	Zhodnocení pro několik hodnot asymetrie	21
5.3.1	100% stejnosměrná složka	21
5.3.2	67% stejnosměrná složka	22
5.3.3	50% stejnosměrná složka	23
5.3.4	33% stejnosměrná složka	24
5.3.5	0% stejnosměrná složka - symetrický zkrat	25
5.4	Diskuse výsledků	26
6	Závěr	29
6.1	Vyhodnocení výsledků práce	29
6.2	Možnosti navazující práce	29
	Reference, použitá literatura	30
	Přílohy	31
A	Použité skripty a funkce	31
A.1	Funkce asymzkratsymbolic.m	31
A.2	Funkce dpzk.m	32

Seznam obrázků

2.1	Typický průběh symetrického zkratového proudu	3
2.2	Typický průběh asymetrického zkratového proudu	4
3.1	Kresba oblouku s vyznačenými klíčovými parametry	7
3.2	Dynamický oblouk - odezva na skokovou změnu proudu	8
3.3	Obecné blokové schéma el. oblouku dle kybernetické teorie	12
4.1	Dvouparametrové znázornění zotaveného napětí při TF	15
4.2	Porovnání zkratového obvodu pro TF a SLF	16
5.1	Schéma řešeného obvodu	19
5.2	Průběh zkratového proudu se 100% ss. složkou	21
5.3	Průběh zkratového proudu s 67% ss. složkou	22
5.4	Průběh zkratového proudu s 50% ss. složkou	23
5.5	Průběh zkratového proudu se 33% ss. složkou	24
5.6	Průběh zkratového proudu s nulovou ss. složkou	25
5.7	Porovnání výsledků v poměrných jednotkách	27
5.8	Závislost limitního namáhání vypínače na době do průchodu proudu nulovou hodnotou pro dané uspořádání (t_0 je poměrná doba od vzniku zkratu do průchodu proudu nulou a respektuje asymetrii: $t_0 = 1$ pro symetrický zkrat a $t_0 = 1,77$ pro plnou asymetrii)	28

Seznam tabulek

5.1	Klíčové hodnoty pro 100% ss. složku	21
5.2	Klíčové hodnoty pro 67% ss. složku	22
5.3	Klíčové hodnoty pro 50% ss. složku	23
5.4	Klíčové hodnoty pro 33% ss. složku	24
5.5	Klíčové hodnoty pro 0% ss. složku	25
5.6	Porovnání výsledků	26
5.7	Porovnání výsledků v poměrných jednotkách	26

Seznam symbolů a zkratek

A	tepelná energie
B	indukce magnetického pole
C_A	kapacita náhradního jednodukmitočtového obvodu
e	Eulerova identita
f	kmitočet
φ	fázový posuv, el.úhel
G	vodivost el. oblouku
γ	měrná el. vodivost
H	intenzita magnetického pole
i, i_a	el. proud, proud obloukem
ITI	Interrupting time interval. Interval plné vypínací schopnosti
L	indukčnost
l_a	délka oblouku
P_z	el.příkon do oblouku
p_z	měrný el. příkon do oblouku
PZN	Přechodná složka zotaveného napětí
Q	tepelný obsah oblouku
q	měrný tepelný obsah oblouku
s_{lim}	limitní strmost zotaveného napětí
T	teplota oblouku
τ	časová konstanta
u_a, U_{ob}, U_{zn}	napětí oblouku, obnovené napětí, zotavené napětí
ω	úhlová rychlost
Z_0	vlnová impedance

1

Úvod

Již od počátku elektrizace je spolu s rozvojem elektrizační soustavy kladen požadavek na rozvoj a kvalitu elektrických přístrojů, zejména výkonových vypínačů. V posledních letech se do popředí dostává problematika vypínací schopnosti a její časové závislosti. V tlakoplynových vypínačích, které jsou v současné době nejpoužívanějšími vypínači na hladinách vvn/zvn, je plná vypínací schopnost dána prouděním plynu na 10 - 15 ms. V tomto intervalu máme zajištěné dva průchody proudu nulovou hodnotou, což je součástí mezních charakteristik a norem pro zkoušení vypínačů.

V posledních letech se vyskytly havárie vypínačů, které měly za následek např. částečný blackout v Brazílii [6]. Následné analýzy prokázaly, že poruchy spadají do problematiky tzv. narušeného vypínání. Tak je nazýváno vypínání, při kterém vznikne v již probíhajícím běžném provozním vypínání nesymetrický zkrat. Pak vlivem asymetrie zkratového proudu dojde k prodloužení intervalů průchodu proudu nulou (až na více než 18 ms). To znamená, že průchod proudu nulou nastává až v čase, ve kterém již vypínací schopnost klesla na téměř nulovou hodnotu. Tento statisticky náhodný jev nastává mimořádně a je způsoben časovou souhrou nepříznivých a navzájem nezávislých jevů elektrických a mechanických.

Úkolem této práce je částečně analyzovat rozdílné vlivy asymetrických zkratů, prozkoumat nutnost prodloužení vypínací schopnosti a odvodit potřebné intervaly vypínání, které budou vyhovovat i zmíněným podmínkám narušeného vypínání. Toto je i současným tématem v komisích CIGRE a IEEE. Tato práce je rovněž první částí rozsáhlejšího celku zkoumání vzájemných vztahů mezi elektrickou sítí a vypínačem, čemuž bych se rád věnoval i v následné diplomové práci. Proto jsou v závěru uvedeny i možnosti navazujícího zkoumání.

2

Zkraty - teoretický rozbor

Zkratem rozumíme poruchu, kdy dojde k vodivému spojení dvou částí sítě, proudový okruh se pak neuzavře přes spotřebič, přičemž hodnota tohoto zkratového proudu převyšuje maximální hodnotu proudu jmenovitého. Ideální odpor zkratu je nulový, ve skutečnosti je dán odporem spojení a přírodními vodiči. V elektrických sítích nejčastěji dochází ke zkratu následkem spojení vodičů na venkovním vedení, ztrátou izolační schopnosti použité izolace, atmosférickými vlivy apod.

2.1 Rozdělení zkratových proudů

Existuje několik dělení zkratů dle různých kritérií, například rozlišujeme dle počtu spojených fází na:

- Trojpólový izolovaný zkrat
- Trojpólový zemní zkrat
- Dvoupólový izolovaný zkrat
- Dvoupólový zemní zkrat
- Jednopolový zemní zkrat

Přičemž zkratové poměry závisí na druhu provozu uzlu sítě [1].

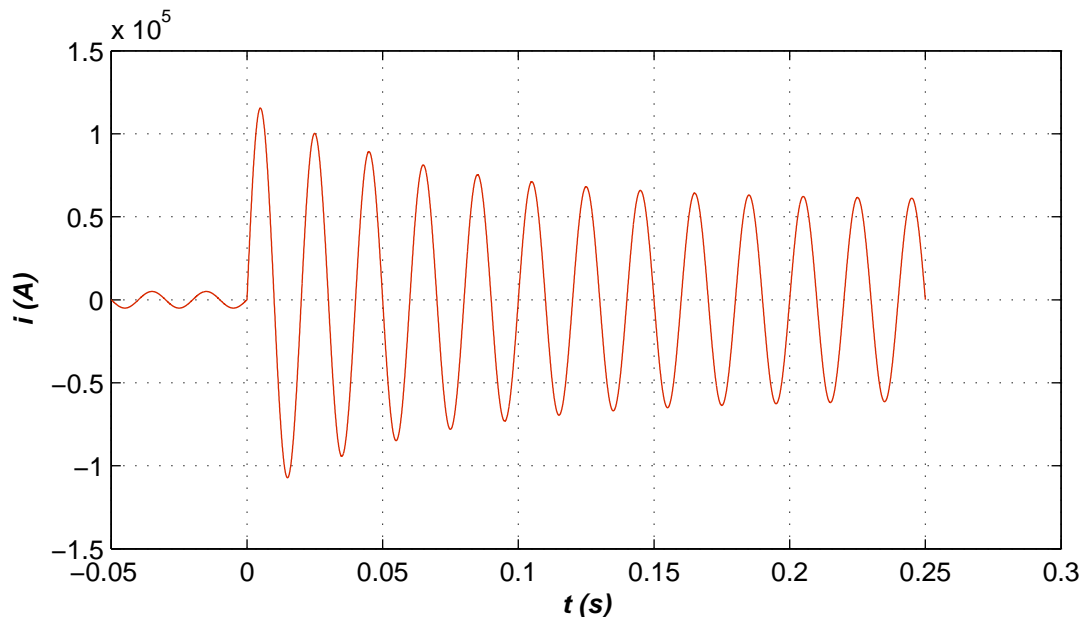
Nejzákladnější dělení, kterým se zabývá i tato práce, je rozdělení zkratů na symetrické a asymetrické. Toto je dělení, které zkoumá v závislosti zkratového proudu na čase symetrii podle časové osy.

2.1.1 Symetrický zkrat

Symetrický zkrat je charakterizován tím, že energie akumulovaná v indukčnosti sítě je v okamžiku zkratu nulová. Tento jev nastane v nulové hodnotě proudu.

$$W_m = L \cdot i^2 = 0 \rightarrow i = 0 \quad (2.1)$$

Z tohoto důvodu se nevyvine žádná stejnosměrná složka, která by průběh zkratového proudu posunula nad časovou osu. To znamená, že symetrický zkratový proud v prvních půlvlnách nedosahuje takových hodnot jako asymetrický, tudíž tento je nejpříznivější z hlediska mechanických a tepelných účinků. Bohužel při zkoumání namáhání vypínače, které je dáno di/dt je při symetrickém proudu tato derivace největší.



Obr. 2.1: Typický průběh symetrického zkratového proudu

2.1.2 Asymetrický zkrat

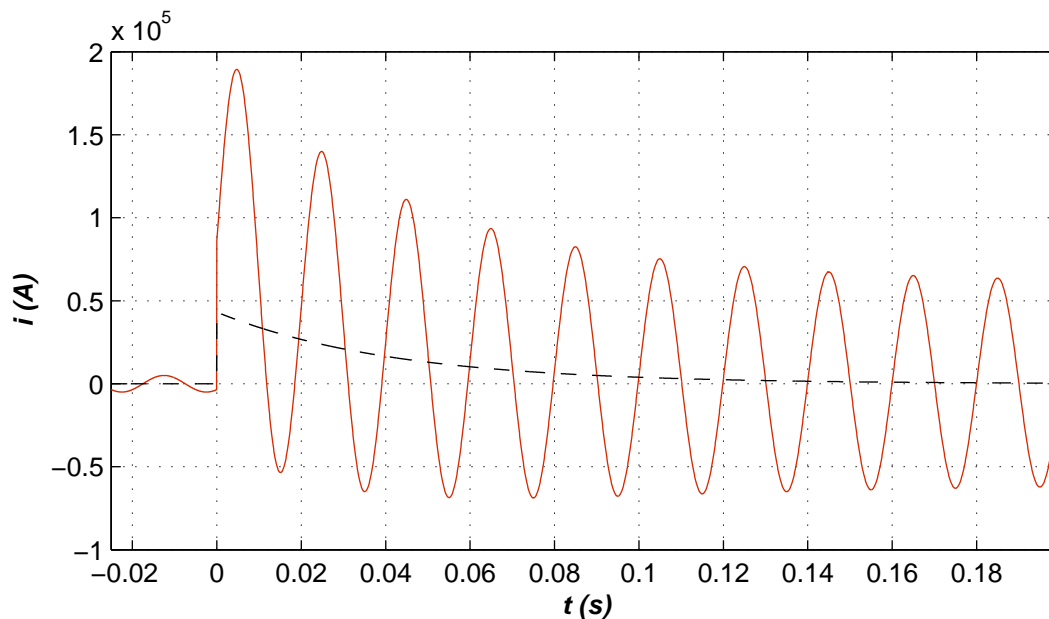
V ideálním zkratovém obvodu se odpor poruchy rovná nule, zkratový proud je omezen pouze induktivní reaktancí obvodu a fázový posuv mezi napětím a proudem je 90° . Nejhorším případem okamžiku vzniku zkratu je tedy napěťová nula. Ve skutečnosti však není úhel posuvu rovný 90° a nejhorší případ tedy nastává mimo napěťovou nulu; v následujících výpočtech však budeme tento fakt předpokládat.

Asymetrický zkratový proud je superpozicí symetrického zkratového proudu (střídavá složka) a stejnosměrné složky. Tato stejnosměrná složka vzniká díky energii akumulované v indukčnosti obvodu, je tedy přímo úměrná okamžité hodnotě proudu v okamžiku vzniku zkratu. Stejnosměrná složka zkratového proudu exponenciálně klesá z počáteční hodnoty s časovou konstantou τ , která je dána induktivní reaktancí X a odporem R .

V problematice asymetrických zkratů je nebezpečný fakt, že vlivem stejnosměrné složky se může průběh zkratového proudu vychýlit nad osu tolik, že v první periodě neprojde nulovou hodnotou. To znamená, že spínací oblouk bude ve zhašovací komoře vypínače hořet po dobu delší, než je jedna perioda, čímž může dojít k selhání a následnému

zničení vypínače.

Typický průběh asymetrického zkratu s vyznačenou stejnosměrnou složkou je na následujícím obrázku:



Obr. 2.2: Typický průběh asymetrického zkratového proudu

2.2 Účinky zkratových proudů

2.2.1 Mechanické účinky zkratových proudů

Z důvodu elektrodynamických sil dochází v prvních půlvlnách zkratového proudu k největšímu mechanickému namáhání soustavy (vodiče, přípojnice, vinutí, ...), protože tyto elektrodynamické síly jsou úměrné kvadrátu proudu.

Protéká-li dvou vodičovým vedením kruhového průřezu proud

$$I = \oint H \cdot dl = 2\pi \cdot r \cdot H \quad (2.2)$$

pak síla působící na druhý vodič je

$$F = B_1 \cdot I_2 \cdot l = \mu \cdot H \cdot I_2 \cdot l = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{I_1}{2\pi \cdot r} \cdot I_2 \cdot l = 2 \cdot 10^{-7} \cdot l \cdot \frac{I^2}{r} \quad (2.3)$$

2.2.2 Tepelné účinky zkratových proudů

Vlivem Jouleových ztrát při průchodu proudu vodičem dochází k jeho oteplování, tudíž i při průchodu zkratového proudu dojde k nárůstu produkované tepelné energie, která je přímo úměrná odporu vodiče, kvadrátu proudu a době trvání zkratu.

$$A = RI^2 \cdot t \quad (2.4)$$

Na tomto principu pracují např. pojistky a jističe v sítích nn.

Pro výpočty tepelných účinků zavádíme tzv. ekvivalentní oteplovací proud I_{KE} , který udává efektivní hodnotu střídavého proudu, který má za dobu zkratu stejné tepelné účinky jako skutečný průběh zkratového proudu.

$$I_{KE} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \cdot \int_0^{t_k} i^2 dt} \quad (2.5)$$

2.3 Statistická četnost zkratů v sítích vvn/zvn

V české přenosové soustavě vvn/zvn se za posledních 10 let vyskytnulo ročně cca 130 zkratových poruch. Zhruba 95% jsou jednofázové poruchy, z nichž asi 90% skončí tak, že proběhne úspěšný cyklus automatického opětného zapnutí. Zbytek poruch jsou buď dvoufázové anebo ty, které se během vypínacího děje rozvinuly ve vícefázové. Z hlediska symetrický/asymetrický se udává poměr 1 symetrický zkrat na 9 asymetrických.

Velikost ustálených zkratových proudů je velice úzce spjata s danou poruchou. Není tedy příhodné velikosti statisticky průměrovat, protože každá zkratová porucha je jedinečná. Mezi nejrelevantnější vlivy patří místo zkratu (v blízkosti elektrárny či na konci dlouhého jednostranně napájeného vedení), odpor poruchy (kovový zkrat či několikaohmové spojení) a konfigurace obvodu v daném místě.

3

Spínací elektrický oblouk

3.1 Vznik spínacího oblouku

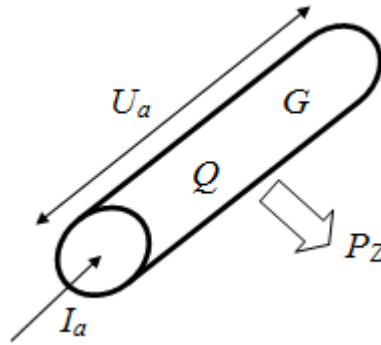
Elektrický oblouk je druh elektrické výbojové činnosti, která nepotřebuje žádný vnější zdroj energie pro svoji existenci a překlenuje celou vzdálenost elektrod; jedná se tedy o samostatný a úplný výboj. Vyznačuje se následujícími parametry:

- Velká proudová hustota ($1 - 10^5 \text{ A/cm}^2$)
- Nízká hodnota katodového úbytku (jednotky až desítky V)
- Vysoká teplota elektrod podporující elektronovou emisi
- Vysoká teplota ionizovaného plynu (plazmatu) mezi elektrodami (50.000 K)

Vznik elektrického oblouku je obecně složitý fyzikálně-chemický proces. Nutným předpokladem je dostatečné množství disociační a ionizační energie, která plyn v mezielektrodovém prostoru rozloží na jednotlivé kladné ionty a záporné elektrony. Tento proces je popsán Sahovou rovnicí. Tyto částice urychlované elektrickým polem tvoří lavinu dalších elektronů, které spolu s primárními elektrony vytvoří vodivou cestu mezi elektrodami a dojde k přeskoku a zapálení oblouku [9].

V elektrických přístrojích popisujeme vznik elektrického (spínacího) oblouku následovně [8]: rozpojením kontaktů přístroje prudce vzroste stykový odpor kontaktu, vlivem Jouleových ztrát dojde k odpovídajícímu ohřevu a odparu materiálu kontaktů, což vytvoří kovové páry, čili vodivé prostředí mezi elektrodami. To způsobí zápal oblouku, jež ionizuje plyn a vzniklý oblouk hoří nadále. V případě vypnutého stavu může vlivem vysoké hodnoty napětí mezi elektrodami dojít k přeskoku a jiskrový výboj vytvoří vodivý kanál a následuje hoření oblouku. Pro fyzikální rozbor elektrického oblouku vycházíme z popisných (fenomenologických) veličin, které odpovídají vlastnostem daného oblouku. Názorně uvedeno na obrázku 3.1.

Hořící el. oblouk je jako každý fyzikální děj závislý na čase, proto pro jeho zkoumání rozlišujeme dva stavy: *stacionární* a *dynamický*.



Obr. 3.1: Kresba oblouku s vyznačenými klíčovými parametry

3.2 Stacionární elektrický oblouk

Jde o ustálený stav, kdy se klíčové veličiny v závislosti na čase nemění. Prakticky je velice těžko realizovatelný. Nicméně se stacionárním obloukem se setkáváme u plazmatronů a pro zjednodušení analýzy řešíme stacionární oblouk v určitých intervalech hoření v trysce vypínače.

Tento stav je popsán rovnicí Ayrtonové:

$$U_a = \alpha + \beta \cdot l_a + \frac{\gamma + \delta l_a}{I} \quad (3.1)$$

Vzhledem k tomu, že kromě U_a a I jsou všechny členy rovnice konstanty, lze psát rovnici Ayrtonové v upraveném tvaru:

$$U_a \cdot I^\sigma = konst. \quad (3.2)$$

Tato rovnice je matematickým zápisem hyperboly. Odtud je patrné, že volt-ampérová charakteristika stacionárního oblouku je hyperbolou, tedy obloukové napětí je nepřímo úměrné proudu.

Energetickou bilanci stacionárního oblouku popisuje Elenbaas-Hellerova rovnice, jež znázorňuje elektrotepelné procesy - obloukem přivedený výkon způsobuje tepelné ztráty, které musíme odvést.

$$U_a \cdot I_a = P_{Z\text{vedením}} + P_{Z\text{proudením}} + P_{Z\text{saláním}} \quad (3.3)$$

$$\gamma \cdot E^2 = \rho \cdot J^2 = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}\theta) + c_p \cdot m_v \cdot \rho \cdot \text{grad}\theta + s_z(T) \quad (3.4)$$

3.3 Dynamický elektrický oblouk

Tento děj je charakterizován rychlými a nahodilými změnami. Hořící oblouk se vyznačuje velmi vysokou teplotou, v řádech tisíců kelvinů, proto je oblouk charakterizován i určitým tepelným obsahem. Ten díky tepelné setrvačnosti soustavy nelze měnit skokově. Mírou

této tepelné setrvačnosti je časová konstanta oblouku τ , která charakterizuje rychlost odezvy sledované veličiny (např. obloukového napětí) na skokovou změnu vstupní veličiny (proudu) [1].

Energetická bilance dynamického oblouku říká, že elektrický výkon dodávaný oblouku se rozděluje na hrazení ztrát v oblouku P_z a na změnu tepelného obsahu dQ/dt , což popisuje rovnice:

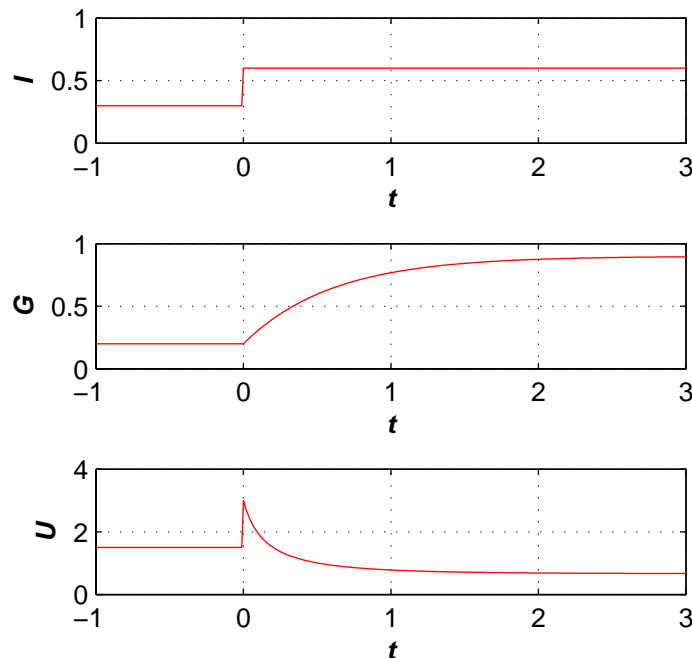
$$u_a \cdot i_a = \frac{dQ}{dt} + P_z \tag{3.5}$$

Z této rovnice je možné určit časovou konstantu oblouku, která jest poměrem tepelného obsahu a odvedeného výkonu:

$$\tau = \frac{Q}{P_z} \tag{3.6}$$

Protože veličiny Q i P_z jsou nelineárně závislé na teplotě, lze takto definovanou časovou konstantu uvažovat jen v omezeném rozmezí proudů.

Další možnost určení časové konstanty je sledování odezvy obloukového napětí na skokovou změnu proudu. Z důvodu tepelné setrvačnosti se i vodivost oblouku G musí měnit spojitě, proto se ani obloukové napětí nezmění skokem, ale spojitě. Průběhy jsou naznačeny na obrázku:



Obr. 3.2: Dynamický oblouk - odezva na skokovou změnu proudu

Aplikací poznatků dynamického oblouku lze odvodit jeho volt-ampérovou charakteristiku, poněvadž síťový kmitočet 50 Hz představuje dostatečně rychlé změny.

3.4 Modely elektrického oblouku

V předchozí části bylo ukázáno, že chování dynamického elektrického oblouku je závislé na mnoha parametrech. Při analýze spínacího procesu a návrhu zařízení je proto nutné sledovat chování oblouku a jeho vlastnosti, z čehož vzešel požadavek na matematický popis oblouku. V současné době rozlišujeme (z hlediska principů nahlížení na el.oblouk) tzv. *black-box modely* a *modely s popisem fyzikálních procesů*. V prvním případě se na oblouk díváme jako na celek popsáný danými rovnicemi, v druhém případě sledujeme stavy, které mohou nastat na základě fyzikálních zákonitostí.

Dnes rozšířenější a v mnoha směrech probádanější problematikou jsou black-box modely. Bylo zpracováno mnoho teorií, které se liší zejména v přijatých zjednodušujících předpokladech. Mezi používané modely patří zejména: model definovaný obloukovým napětím, model definovaný volt-ampérovou charakteristikou, Cassieho - Mayrův model a kybernetické modely. Cassieho - Mayrův model oblouku představuje přesný a názorný náhled na spínací oblouk. Samotný model se skládá ze dvou dílčích teorií - Cassieho a Mayrovi, přičemž se obě zaměřují na energii v samotném sloupci hořícího oblouku; liší se jen úvodním zjednodušením.

3.4.1 Cassieho model oblouku

Výchozí rovnicí pro analýzu oblouku je rovnice energetické bilance dynamického oblouku:

$$u_a \cdot i_a = \frac{dQ}{dt} + P_z \quad (3.7)$$

Zjednodušující předpoklady pak jsou:

1. Teplota oblouku T , obloukové napětí U_a , měrná vodivost γ a tepelná energie v jednotce objemu q jsou konstantní
2. Průměr oblouku se mění v závislosti na procházejícím proudu

Cassieho teorie je platná pro oblouk hořící v rychle proudícím prostředí, kdy médium proudí souhlasně s osou oblouku. Uplatňuje se odvod ztrát prouděním z celého povrchu oblouku, čili veškerý přivedený výkon se mění na tepelné ztráty odvedené proudícím médiem. To je v přímé ekvivalenci s tím, že předpokládáme konstantní teplotu oblouku T . Tím, že T , U_a , γ a q jsou konstantní, získáme pro válec oblouku jednotkové délky následující vztahy: [2]

$$G = \pi \cdot r^2 \cdot \gamma \quad (3.8)$$

$$Q = \pi \cdot r^2 \cdot q \quad (3.9)$$

$$P_z = \pi \cdot r^2 \cdot p_z \quad (3.10)$$

Pak tedy

$$\frac{Q}{q} = \frac{G}{\gamma} = konst. \Rightarrow Q = \frac{q}{\gamma} \cdot G \quad (3.11)$$

Rovnici

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{q}{\gamma} \cdot \frac{dG}{dt} \quad (3.12)$$

dosadíme do energetické bilance oblouku. Postupnými úpravami pro stacionární stav získáme výslednou rovnici Cassieho teorie:

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left[\left(\frac{u_a}{U_{as}} \right)^2 - 1 \right] \quad (3.13)$$

V uvedené rovnici se nevyskytuje proud obloukem I a ztráty P_z , které jsou zahrnuty v časové konstantě:

$$\tau = \frac{Q}{P_z} = \frac{q}{p_z} \quad (3.14)$$

Ve výsledné rovnici je obloukové napětí U_{as} v ustáleném stavu, čemuž odpovídá ustálený stav vodivosti $G = I_s/U_{as}$. Z toho důvodu bude levá strana rovnice rovná nule, protože $dG/dt = 0$. Mění-li se stacionární stav oblouku, pak se G a u_a mění podle výše uvedené diferenciální rovnice. Nový ustálený stav je charakterizován stejným úbytkem napětí na oblouku U_{as} , změní se poměr oblouku r a s ním i nově ustálené hodnoty G , Q a P_z .

3.4.2 Mayrův model oblouku

Obdobně jako u Cassieho teorie, i Mayrova teorie vychází z rovnice energetické bilance dynamického oblouku

$$u_a \cdot i_a = \frac{dQ}{dt} + P_z \quad (3.15)$$

Rozdíl je však ve zjednodušujících předpokladech, které Mayr stanovil takto:

1. Průměr oblouku $2r$ je konstantní
2. Ztráty konvekcí P_z jsou konstantní
3. Vodivost oblouku odpovídá vztahu $G = k \cdot e^{(Q/Q_0)}$, kde Q_0 je množství tepla, při jehož dodání do oblouku se vodivost zvětší v poměru $e : 1$
4. Je stanoven předpoklad konstantních ztrát kondukcí, předpokládáme tedy statickou charakteristiku ve tvaru $U_a \cdot I = konst.$

Prvním krokem je logaritmování a následná derivace rovnice z předpokladu č.3:

$$\ln G = \ln k + \ln \frac{Q}{Q_0} \quad (3.16)$$

$$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{Q_0} \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (3.17)$$

$$\frac{dQ}{dt} = Q_0 \frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} \quad (3.18)$$

Dosazením tohoto výrazu do energetické bilance za dQ/dt dostaneme diferenciální rovnici dynamického oblouku:

$$\frac{dG}{dt} + \frac{P_z}{Q_0} \cdot G = \frac{u_a \cdot i}{Q_0} \cdot G \quad (3.19)$$

Upravíme do tvaru:

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u_a \cdot i}{P_z} - 1 \right) \quad (3.20)$$

V rovnici 3.20 obsahuje časová konstanta τ předpokládané konstanty Q_0 a P_z .

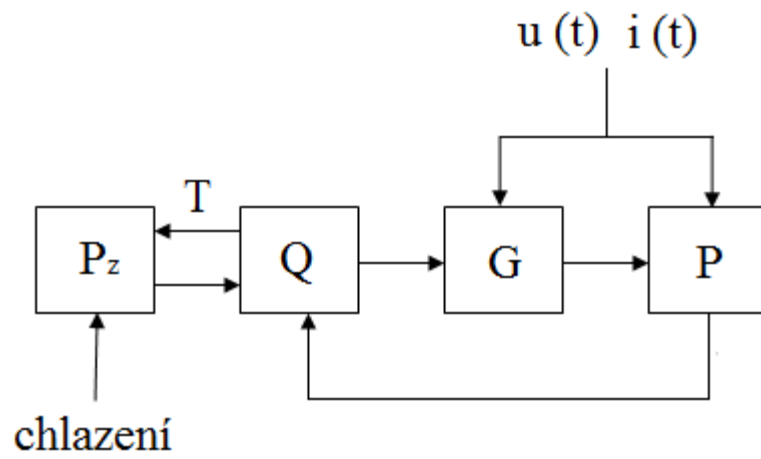
3.4.3 Kybernetický model oblouku

Kybernetické modely oblouku zaznamenaly vývoj v druhé polovině minulého století, kdy díky počítačům docházelo k automatizaci procesů. Proto bývají kybernetické teorie znázorněny jako blokové schéma s navzájem provázanými prvky se zpětnou vazbou. Většinou se jedná o modifikace Mayrovy teorie pro dynamický oblouk. Kybernetická teorie vychází z faktu, že elektrický oblouk je definován vodivostí G a příkonem P . Obě veličiny jsou funkcí $i(t)$ a $u_a(t)$. Mezi nejužívanější patří *kybernetický model typu Q*, nebo *modely typu P - τ*.

3.4.4 Aplikace modelů oblouku pro vypínací proces

Po uveřejnění Cassieho a Mayrovy teorie bylo provedeno mnoho dalších rozborů, ale většina již stavěla na těchto dvou dílčích teoriích. Například Brownova zobecněná teorie spínacího oblouku již zahrnuje celou oblast hoření dynamického oblouku, ale tak, že v silnoproudém intervalu využívá Cassieho a v interakčním intervalu Mayrovu teorii.

Tento fakt je přínosný pro konstruktéry vypínačů, kteří musejí zajistit chlazení v silnoproudém intervalu a zároveň využít Mayrovu teorii pro rozhodující interakční interval.



Obr. 3.3: Obecné blokové schéma el. oblouku dle kybernetické teorie

4

Vypínací proces - intervaly, zotavené napětí

Vypínacím procesem rozumíme děj (a pochody s tímto související), který začne v okamžiku oddálení kontaktů. Tento děj je ukončen, když kontakty vypínače jsou v rozepnuté poloze, spínací oblouk byl uhašen a nedochází k opakovaným průrazům. Vypínací proces je závislý na mnoha parametrech, mezi inherentní patří okamžité napětí a proud v okamžiku rozpojení kontaktů, následně pak obloukové napětí dané vlastnostmi a typem zhašecího media.

Rozeznáváme 3 časové intervaly, které se liší poměry uvnitř a vně vypínače: silnoproudý, interakční a dielektrický interval. Rozdělení vypínacího procesu do těchto intervalů umožňuje snadněji vysvětlit a specifikovat základní kritéria, které musí vypínač splňovat pro spínací procesy.

4.1 Silnoproudý interval

V tomto intervalu neuvažujeme vzájemné působení (interakci) mezi obloukovým napětím a proudem oblouku. Silnoproudý interval nastává v oblasti velkých proudů, které procházejí obloukem při oddálení kontaktů. Proud je v tomto případě dán vlastními parametry obvodu, protože v oblasti velkých proudů je obloukové napětí poměrně malé a činný odpor oblouku je zanedbatelný proti impedanci vypínaného obvodu (tento fakt však neplatí pro vypínání malých induktivních a kapacitních proudů).

Protože při sinusovém průběhu proudu je v okolí maxima malá změna proudu, lze oblouk v silnoproudém intervalu považovat za stacionární.

Budeme-li uvažovat změnu proudu o 10% tedy $I/I_{MAX} = 0,9$, pak tomuto odpovídá časový interval:

$$\Delta t = 2 \cdot \frac{1}{\omega} \arcsin(0,9) = 2 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot 50} \arcsin(0,9) = 2,78 \cdot 10^{-3} [s] \quad (4.1)$$

Což odpovídá 27,8% doby půlperiody proudu [1].

Pro řešení oblouku v silnoproudém intervalu lze využít poznatků Cassieho teorie, která platí v této oblasti velkých proudů voltampérové charakteristiky. Oblouk má velký průměr a je třeba stanovit kritéria, aby hoření oblouku v silnoproudé oblasti nenarušilo vypínací proces. Např. v tlakoplynových vypínačích může dojít k tzv. zahlcení trysky, kdy je narušeno proudění plynu. Vlivem termodynamických pochodů pak může nastat termické selhání.

4.2 Interakční interval

Tento časový interval sledujeme v okolí proudové nuly. Interakční interval je charakterizován interakcí mezi proudem a obloukovým napětím, tj. mezi spínacím obloukem a obvodem, a je klíčovým pro úspěšné či neúspěšné vypnutí. Počáteční podmínky v interakčním intervalu jsou dány podmínkami hoření oblouku v silnoproudém intervalu (prakticky nelze tyto dva časové úseky zcela jasně oddělit).

Interakční interval je oblast rychlé změny proudu a obloukového napětí, vlivem tepelné setrvačnosti se tedy projeví i časová konstanta oblouku. Interakční interval lze rozdělit do dvou dílčích intervalů - interval výrazné změny obloukového napětí a interval zbytkového proudu. Nedojde-li v prvním dílčím intervalu k výraznému nárůstu obloukového napětí před proudovou nulou, může nastat termické selhání. V druhém dílčím intervalu prochází obvodem malý zbytkový proud daný zbytkovou vodivostí mezi kontakty. Vzhledem k energetické bilanci se snažíme omezit velikost i dobu trvání tohoto zbytkového proudu.

4.3 Dielektrický interval

Na rozdíl od předchozích, tento interval nastane přesně v okamžiku přerušení proudu v obvodu. Při selhání v dielektrickém intervalu, kdy vlivem přeskočků nastane opět zapálení oblouku, lze sledovat skok v průběhu di/dt z nulové na maximální hodnotu.

V dielektrickém intervalu je vypínací dráha mezi kontakty namáhána časově proměnným zotaveným napětím, jehož průběh je dán vypínaným elektrickým obvodem a vypínací disciplínou (blízký a svorkový zkrat, vypínání malých induktivních a kapacitních proudů). Za úspěšné vypnutí považujeme stav, kdy průrazné napětí ve vypínací dráze je v každém okamžiku vyšší než zotavené napětí. V opačném případě dojde k opětovnému přeskočků, tento stav nazýváme dielektrickým selháním vypínače. Rozložení elektrické pevnosti ve vypínací dráze je ovlivňováno termodynamickými poměry z předchozího hoření oblouku. Proto k nejčastějším případům dielektrického selhání dochází v počáteční fázi nárůstu zotaveného napětí, ještě před maximální hodnotou.

4.4 Zotavené napětí

Zotavené napětí je napětí, které se na kontaktech vypínače objeví po uhasnutí oblouku, tedy po přerušení proudu, přičemž se přechodovým dějem vyrovnává úbytek napětí na odporu oblouku na napětí zdroje v místě vypínače. Zotavené napětí je superpozicí obnoveného napětí (napětí zdrojové strany) a přechodovým jevem (strana sítě). Obnoveným napětím rozumíme napětí zdroje v okamžiku přerušení proudu:

$$U_{ob} = U_S \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sin \varphi \quad (4.2)$$

Přechodná složka zotaveného napětí (PZN) je závislá na druhu zkratu.

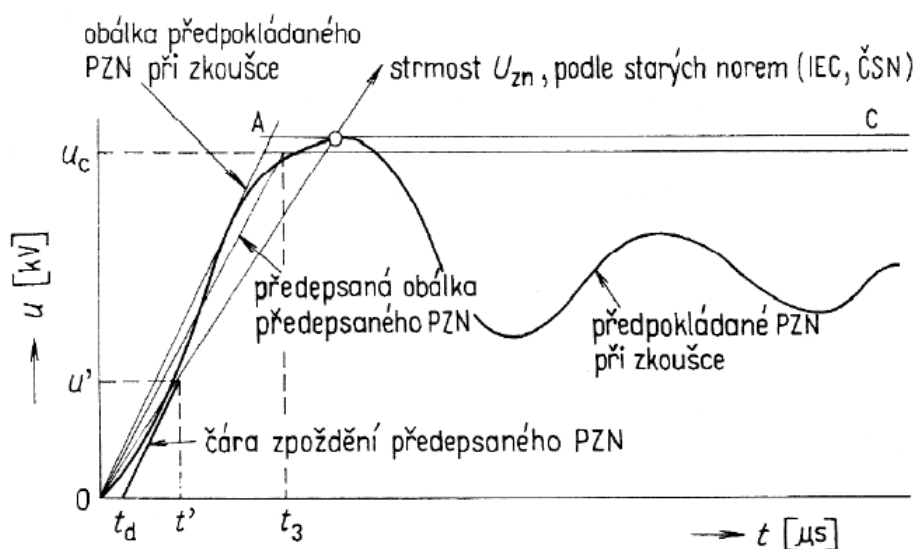
4.4.1 PZN při svorkovém zkratu

Svorkovým zkratem (angl. *terminal fault* - TF) rozumíme poruchu, která vznikla v blízkosti svorek vypínače (v rámci rozvodny), není tedy omezen reaktancí ani vedením - svorkový zkrat je tedy charakteristický nejvyššími hodnotami zkratových proudů. Pro výpočet průběhu PZN nahrazujeme členy sítě indukčnostmi a kapacitami, z kterých sestavujeme náhradní obvod, kterým můžeme vypočítat vlastní kmity přechodné složky. Pro náhradní jednodukmitočtový obvod lze průběh zotaveného napětí vypočítat takto:

$$U_{zn} = U_{ob} \cdot (1 - \cos \omega_0 \cdot t) \quad (4.3)$$

V rovnici 4.3 je ω_0 vlastní úhlová frekvence

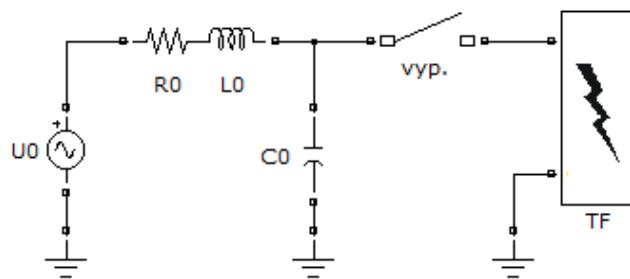
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_A \cdot C_A}} \quad (4.4)$$



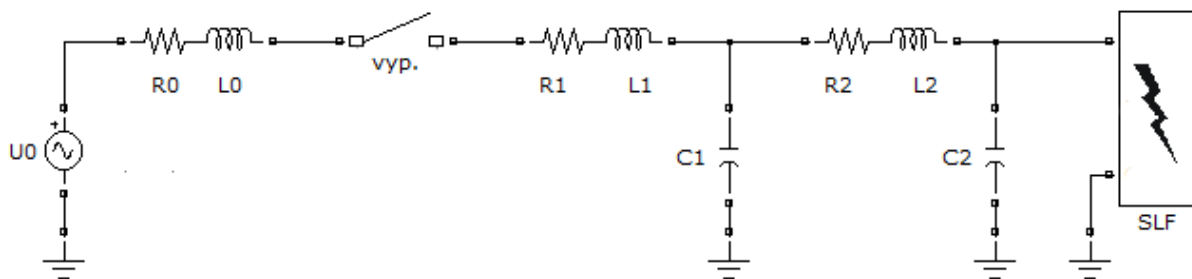
Obr. 4.1: Dvoupřesné znázornění zotaveného napětí při TF

4.4.2 PZN při blízkém zkratu

Blízký zkrat (angl. *short line fault* - SLF) se liší od svorkového ve vzdálenosti poruchy od vypínače. Blízký zkrat nastává ve vzdálenosti několika set metrů až jednotek kilometrů od vypínače. Na této části vedení uvažujeme rovnoměrně rozprostřené pasivní parametry. Zkratový proud tedy je omezován pasivními prvky vedení a nedosahuje takových hodnot jako svorkový zkrat. V okamžiku uhasnutí oblouku je na svorce na straně vedení počáteční napětí rovné úbytku napětí na části sítě. Toto napětí prostorově lineárně klesá k nulové hodnotě v místě zkratu. Díky tlumeným vlnovým pochodům na vedení začne tato napěťová vlna kmitat mezi vypínačem a místem zkratu rychlostí blízké rychlosti světla ve vakuu (cca $3 \cdot 10^8$ m/s). Vzhledem k tomu lze vypočítat, že na straně vedení bude vypínač namáhán napětím s $f \approx kHz$. To znamená, že po vypnutí je vypínač namáhán napětím s velkou strmostí, což je častou příčinou nevypnutí blízkých zkratů.



(a) Zkratový obvod pro TF



(b) Zkratový obvod pro SLF

Obr. 4.2: Porovnání zkratového obvodu pro TF a SLF

4.4.3 PZN při vypínání malých induktivních a kapacitních proudů

Navzdory malým proudům patří i tyto vypínací disciplíny mezi náročné na vypínací proces. K vypínání malých induktivních a kapacitních proudů dochází v praxi poměrně často, a to zejména při spínání transformátorů naprázdno (je odebírán malý magnetizační proud induktivního charakteru) nebo při spínání nezatíženého venkovního vedení, kabelů a kondenzátorových baterií (kapacitní proud o velikosti desítek až stovek ampér).

U vypínačů s velkou vypínací schopností dochází vlivem nestability hoření oblouku k utržívání proudu před přirozenou proudovou nulou. Ve vypínaném obvodu obsahující kapacity a indukčnosti dochází k vysokofrekvenčním proudovým kmitům, které se superponují s proudem jmenovitého kmitočtu. Díky různě velkým amplitudám tak může dojít k vynucené proudové nule před přirozenou nulou první harmonické proudu a dojde k výše zmíněnému utržení proudu. V tu chvíli je v indukčnosti akumulovaná energie $W = \frac{1}{2}L \cdot i^2$. Tato energie způsobí přepěťové rázy, které namáhají izolační pevnost ve vypínací dráze, a dochází k opakovaným průrazům vypínače, tzv. *chopping*. Z hlediska vypínání malých induktivních proudů jsou výhodné maloolejové vypínače.

Při vypínání malých kapacitních proudů, které jsou určeny napájecím napětím a velikostí nabíjené kapacity, dojde po rozpojení na straně vedení k "podržení" maximálního napětí. Napětí na napájecí straně se však dále mění s frekvencí 50 Hz a tak se v čase 10 ms po rozpojení objeví na svorkách vypínače dvojnásobné napětí. Pokud toto napětí způsobí vyšší elektrické namáhání, než je dovolené namáhání vypínací dráhy dojde k průrazu a kapacita na straně vedení se nabije na dvojnásobné napětí. Tento jev se poté opakuje po 10 ms a může dojít až k porušení izolace na vedení. Z tohoto důvodu je na vypínače kladen požadavek, aby vůbec nedocházelo k prvnímu průrazu. Toto označujeme jako bezprůrazové kritérium [8].

4.5 Vypínací schopnost

Vypínací schopností rozumíme časově proměnnou funkci, která udává schopnost vypínače vypnout a následně omezit parametry vypínaných proudů. V první části sleduje průběh vypínací schopnosti průběhu zdvihu kontaktů a po dosažení maximálního zdvihu kontaktů je vypínací schopnost zajišťována prouděním plynu. Tento časový interval je zajištěn na daný časový úsek, který nazýváme vypínací interval (angl. *interrupting time interval* - ITI). Tento interval bývá označován jako t_w a jeho velikost je důležitá pro návrh zhášecí komory. Na vypínací schopnost je nutné brát zřetel při řešení asymetrického či symetrického zkratu. V současných mezních hodnotách a normách pro zkoušení vypínačů je délka ITI dána na 10 až 15 ms, kdy máme garantované dva průchody proudu nulovou hodnotou. Nicméně nedávné havárie vypínačů svědčí o možných případech, kdy k průchodu proudu dojde mimo ITI. V tomto případě již plyn neproudí, vypínací schopnost klesla k nulové hodnotě a vypínač nevypíná. Z tohoto vzešel jasný požadavek - zvýšit či prodloužit vypínací schopnost na konci vypínacího intervalu [3].

5

Analýza namáhání pro různě velké asymetrie zkratového proudu

5.1 Postup práce, definice řešené situace

Pro úspěšné vypnutí a bezporuchový vypínací pochod je nutné: v **silnoprúdém intervalu** udržet nízkou hodnotu součinu $u_a \cdot i$, tzn. nízkou hodnotu tepelných ztrát oblouku - nižší teplota ve zhašecí komoře; v **interakčním intervalu** zajistit dostatečné chlazení - odvod tepla z oblouku; a v **dielektrickém intervalu** zajistit nárůst elektrické pevnosti mezi kontakty s dostatečnou strmostí.

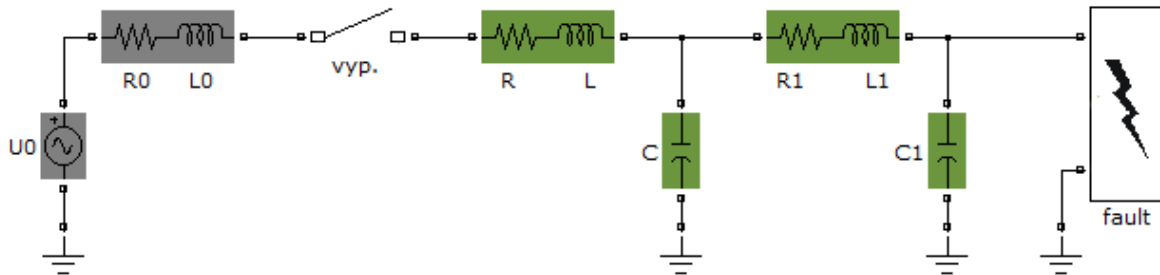
Budeme uvažovat vypínání jednofázového blízkého zkratu s ideálně nulovým odporem poruchy v síti vvn 110 kV. Při analýze budeme předpokládat tlakoplynový vypínač 123kV s maximálním vypínacím proudem 40 kA. Tyto vypínače se v praxi běžně používají. Pro názornost nebudeme uvažovat útlum prvotních amplitud (tedy že obalové křivky průběhu budou mít konstantní vzdálenost). Tato situace je v praxi téměř nerealizovatelná, ale hodí se pro nastínění některých faktů, od kterých se pak odvíjí problematika narušeného vypínání.

Volil jsem následující postup:

1. matematické vyjádření zkratového proudu pro různé hodnoty asymetrie a následný grafický výstup pomocí skriptu **asymzkratsymbolic.m**,
2. odečtení času t_0 , kdy zkratový proud prochází nulou a následný výpočet di/dt (pomocí funkce **dpzk.m**),
3. stanovení limitní strmosti zotaveného napětí jak ze strany sítě, tak ze strany vypínače (rovněž pomocí funkce **dpzk.m**),
4. stanovení namáhání vypínače,
5. vyjádření v poměrných jednotkách, kdy jsou všechny hodnoty vztažené k hodnotě dané veličiny u symetrického zkratu,

6. porovnání a diskuse výsledků.

Na následujícím obrázku je uvedeno principiální schéma řešené situace.



Obr. 5.1: Schéma řešeného obvodu

Na obrázku 5.1 je šedou barvou zvýrazněna zdrojová strana a zelenou barvou jsou vyznačeny rovnoměrně rozprostřené parametry vedení mezi vypínačem a blízkým zkratem.

5.2 Derivace proudu a napětí

Výchozí rovnicí pro průběh zkratového proudu je [3]:

$$i(t) = I_M \cdot \left[\sin(\omega \cdot t - \varphi) + e^{-\frac{R}{L} \cdot t} \cdot \sin \varphi \right] \quad (5.1)$$

Můžeme si všimnout, že druhý člen v hranaté závorce $\left(e^{-\frac{R}{L} \cdot t} \cdot \sin \varphi \right)$ je stejnosměrná složka, zkratového proudu. Proto bude pro různé asymetrie parametrem právě úhel φ .

5.2.1 Derivace proudu

Výpočet pro první člen namáhání vypínače získáme derivováním matematického předpisu pro zkratový proud, což je:

$$i'(t) = I_M \cdot \left[\omega \cdot \cos(\omega \cdot t - \varphi) - \frac{R}{L} \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t} \cdot \sin \varphi \right] \quad (5.2)$$

Kam za t_0 dosazujeme čas, ve kterém zkratový proud poprvé prochází nulou a vypínač reaguje. Zároveň předpokládáme, že k tomuto (prvnímu) průchodu nulou došlo v intervalu plné vypínací schopnosti.

5.2.2 Strmost zotaveného napětí ze strany vedení

Po úspěšném vypnutí je každá svorka vypínače namáhána časově proměnným napětím, které kmitá dle charakteru připojené části sítě. Napětí svorky připojené ke zdrojové straně

je přibližně shodné s napětím zdroje. Avšak svorka na straně vedení je díky vlnovým pochodům namáhána vysokofrekvenčním napětím pilovitého charakteru. Rychlost nárůstu napětí na zdrojové straně je tedy zanedbatelná oproti strmosti na straně vedení.

Výchozí rovnicí zde bude vztah:

$$\frac{du_{zn}}{dt} = -2\pi \cdot f \cdot Z_0 \cdot \frac{di}{dt} \cdot \sqrt{2} \quad (5.3)$$

Z uvedeného vztahu je patrná přímá úměrnost mezi derivací proudu a strmostí u_{zn} . Tedy čím větší bude obvodem daný nárůst proudu, tím větší bude působení sítě na nárůst zotaveného napětí.

5.2.3 Limitní strmost zotaveného napětí ze strany vypínače

Bylo vypracováno několik teorií pro provázání interakčního a dielektrického intervalu. Většina poznatků je však empirických, protože před a po proudové nule jsou v obvodu i ve zhašecí komoře odlišné poměry. Pro posuzování limitní strmosti zotaveného napětí budeme vycházet z obecných závěrů Mayrovy teorie při předpokládaném ideálně přímkovém průběhu zotaveného napětí. Ideální přímkový průběh odpovídá ve skutečném vypínacím procesu počátečnímu nárůstu zotaveného napětí při vypínání blízkých zkratů a obvykle bývá rozhodujícím požadavkem pro dimenzování zhašecích komor vypínače.

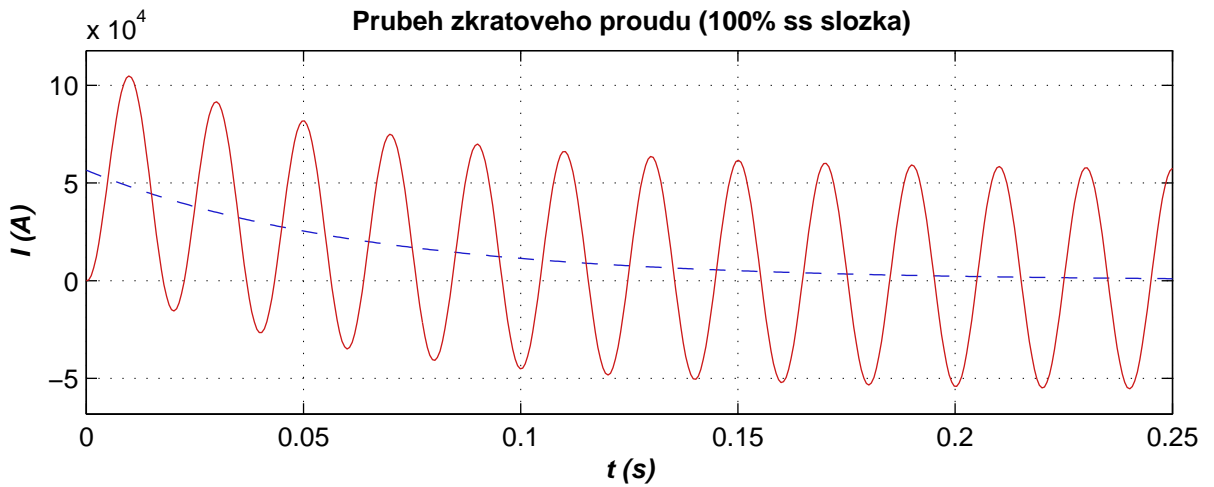
Experimentálními pokusy byla limitní strmost zotaveného napětí u tlakoplynových vypínačů určena jako [7]:

$$s_{lim} = \frac{Cp^{\frac{5}{4}}}{\left(\frac{di}{dt}\right)^m} \cdot f(l_a; l_{a1}) \quad (5.4)$$

V uvedené rovnici je C koeficient závislý na vlastnostech plynu a průměrné teplotě oblouku před proudovou nulou a p je tlak plynu. Člen $f(l_a; l_{a1})$ je funkce úměrná délce oblouku a délce efektivně chlazeného oblouku. Exponent m by měl být stanoven rovněž experimentálně z intervalu $(1; 3/2)$, kdy 1 volíme, pokud odvození vycházelo z Mayrovy rovnice, a $3/2$, pokud odvození vycházelo z Cassieho rovnice.

5.3 Zhodnocení pro několik hodnot asymetrie

5.3.1 100% stejnosměrná složka



Obr. 5.2: Průběh zkratového proudu se 100% ss. složkou

Jedná se o nejneprůzračnější stav - vlivem maximální hodnoty proudu v okamžiku vzniku zkratu dojde k nejzřetelnějšímu vychýlení průběhu nad časovou osu. Z hlediska mechanických a tepelných účinků je tedy 100% stejnosměrná složka nejnebezpečnější pro elektromechanické a tepelné namáhání soustavy, ale derivace proudu při prvním průchodu nulou je nejmenší. Za ideální stav bychom mohli považovat situaci, kdy by se první lokální minimum přímo dotýkalo časové osy - okamžitá hodnota proudu i jeho derivace by v tomto okamžiku byly nulové.

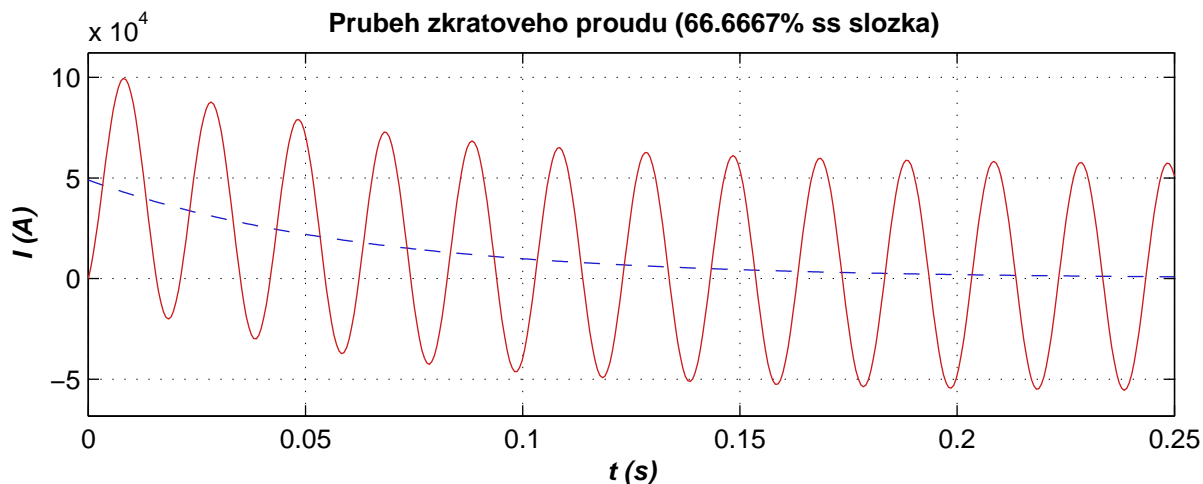
Negativem však zůstává, že vlivem asymetrie se prodlužuje doba hoření oblouku. Interval mezi zapálením a uhasnutím oblouku se může z teoretické hodnoty $T/2$ prodloužit na více než $3T/4$. S tímto je nutné počítat při navrhování zhasací komory, aby vypínač byl schopen efektivně odnámat teplo po celou dobu hoření.

Dalším problémem může být, že uvažováním dříve zanedbaného předpokladu útlumu, se mohou první amplitudy utlumit tak, že (spolu s vlivem asymetrie) první lokální minimum neprotne časovou osu v žádném bodě, ale k průniku dojde až v následujících periodách. Takové případy obvykle končí zahlcením trysky nebo úplným selháním vypínače, kdy už průběh proudu mine vypínací okno t_w a vypínač nevypne.

φ [°]	Ss. složka [%]	t_0 [ms]	I_{KM} [kA]	$(di/dt)_{t_0}$ [A/μs]	$(du_{zn}/dt)_{t_0}$ [kV/μs]	Namáhání vypínače [kVA/μs ²]
90	100	17,73	104,81	-12,31	49,21	605,8

Tab. 5.1: Klíčové hodnoty pro 100% ss. složku

5.3.2 67% stejnosměrná složka



Obr. 5.3: Průběh zkratového proudu s 67% ss. složkou

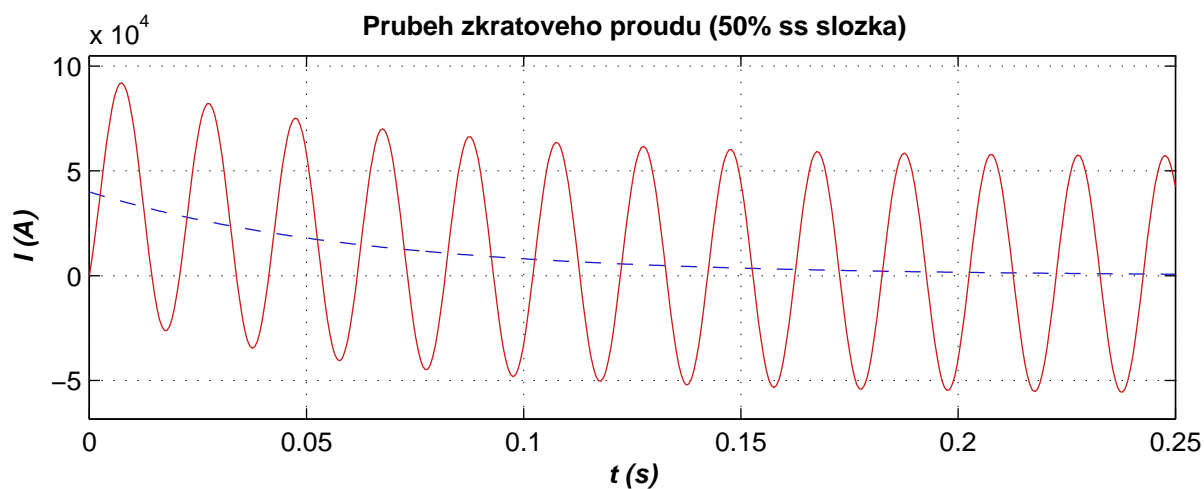
Ke vzniku zkratu došlo v okamžiku, kdy byl průběh proudu posunut o $\pi/3$ od své nulové hodnoty. Vliv asymetrie je dostatečně znatelný. Derivace proudu v okamžiku t_0 je o cca 5% vyšší než u stoprocentní stejnosměrné složky. I zde se v krajních případech může uplatnit posunutí nad časovou osu jako v předchozím případě.

K prvnímu průniku s časovou osou došlo 15,7 ms od vzniku zkratu, se strmostí proudu $-13,69 A/\mu s$. Počáteční strmost zotaveného napětí je $54,75 kV/\mu s$.

φ [°]	Ss. složka [%]	t_0 [ms]	I_{KM} [kA]	$(di/dt)_{t_0}$ [A/ μs]	$(du_{zn}/dt)_{t_0}$ [kV/ μs]	Namáhání vypínače [kVA/ μs^2]
60	67	15,7	99,43	-13,69	54,75	749,5

Tab. 5.2: Klíčové hodnoty pro 67% ss. složku

5.3.3 50% stejnosměrná složka



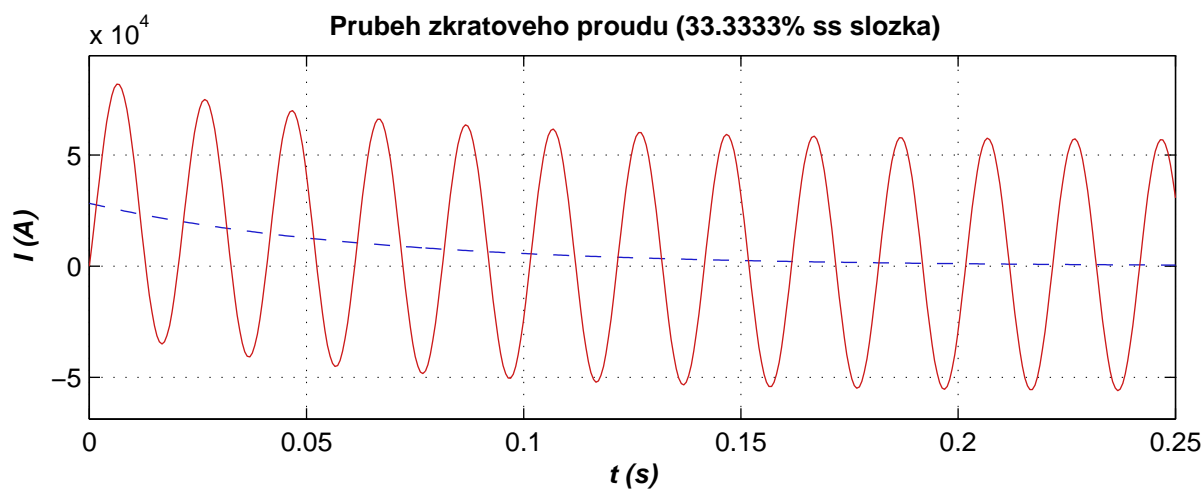
Obr. 5.4: Průběh zkratového proudu s 50% ss. složkou

Ke vzniku zkratu došlo v okamžiku, kdy byl průběh proudu posunut o $\pi/4$. Silno-proudý interval trval 14,4 ms, v tomto čase proud narůstal se strmostí $-15,21$ A/ μ s a zotavené napětí se strmostí 60,81 kV/ μ s.

φ [°]	Ss. složka [%]	t_0 [ms]	I_{KM} [kA]	$(di/dt)_{t_0}$ [A/ μ s]	$(du_{zn}/dt)_{t_0}$ [kV/ μ s]	Namáhání vypínače [kVA/ μ s ²]
45	50	14,4	92,04	-15,21	60,81	924,9

Tab. 5.3: Klíčové hodnoty pro 50% ss. složku

5.3.4 33% stejnosměrná složka



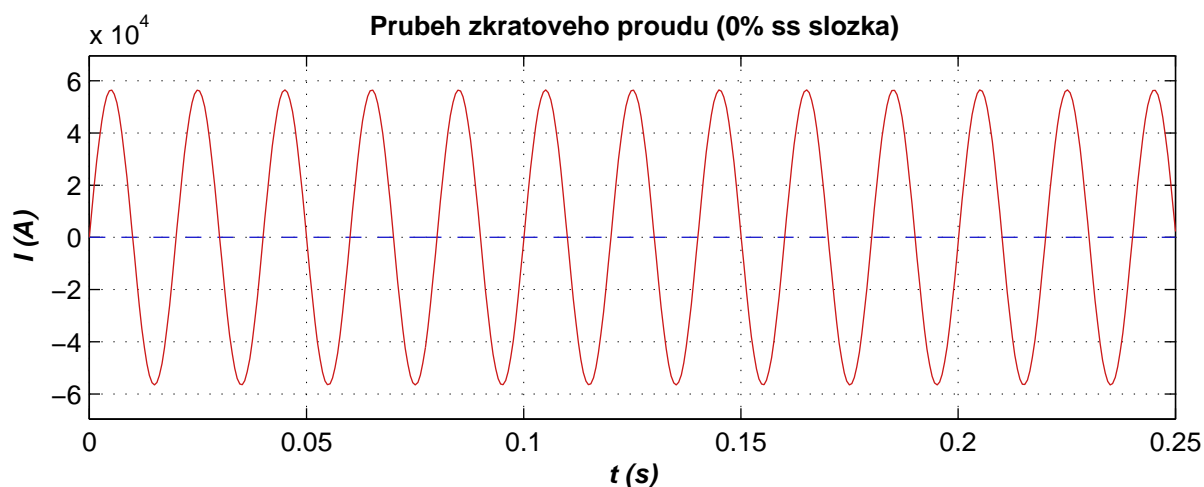
Obr. 5.5: Průběh zkratového proudu se 33% ss. složkou

Zde je již vychýlení nad osu jen mírné, amplituda zkratového proudu dosáhla téměř 82 kA a čas $t_0 = 12,87ms$.

φ [°]	Ss. složka [%]	t_0 [ms]	I_{KM} [kA]	$(di/dt)_{t_0}$ [A/ μ s]	$(du_{zn}/dt)_{t_0}$ [kV/ μ s]	Namáhání vypínače [kVA/ μ s ²]
30	33,3	13	81,84	-16,6	66,39	1102,1

Tab. 5.4: Klíčové hodnoty pro 33% ss. složku

5.3.5 0% stejnosměrná složka - symetrický zkrat



Obr. 5.6: Průběh zkratového proudu s nulovou ss. složkou

V praxi tento stav nastává velice zřídka. V momentě vzniku zkratu byla okamžitá hodnota proudu nulová. Z hlediska dosahovaných hodnot proudu je symetrický zkrat nejpříjemnější, nedochází k posunu nad osu. Ale zároveň je největší hodnota strmosti proudu při průchodu nulou (v tomto případě $-17,77 \text{ A}/\mu\text{s}$), tím pádem i zotavené napětí bude narůstat s větší strmostí ($71,06 \text{ kV}/\mu\text{s}$). Z tohoto důvodu je na symetrický zkratový proud kladen požadavek dostatečně velkého vypínacího okna t_w spolu s rychlým nárůstem elektrické pevnosti v dielektrickém intervalu.

φ [°]	Ss. složka [%]	t_0 [ms]	I_{KM} [kA]	$(di/dt)_{t_0}$ [A/ μ s]	$(du_{zn}/dt)_{t_0}$ [kV/ μ s]	Namáhání vypínače [kVA/ μ s ²]
0	0	10	56,57	-17,77	71,06	1262,7

Tab. 5.5: Klíčové hodnoty pro 0% ss. složku

5.4 Diskuse výsledků

V následující tabulce jsou uvedeny všechny klíčové hodnoty, kterými na vypínač působí síť:

φ [°]	Ss. složka [%]	t_0 [ms]	I_{KM} [kA]	$(di/dt)_{t_0}$ [A/ μ s]	$(du_{zn}/dt)_{t_0}$ [kV/ μ s]	Namáhání vypínače [kVA/ μ s ²]
90	100	17,73	104,81	-12,31	49,21	605,8
60	67	15,7	99,43	-13,69	54,75	749,5
45	50	14,4	92,04	-15,21	60,81	924,9
30	33	13	81,84	-16,6	66,39	1102,1
0	0	10	56,57	-17,77	71,06	1262,7

Tab. 5.6: Porovnání výsledků

Vidíme, že u symetrického zkratu je namáhání vypínače více než dvojnásobné než u zkratu se stoprocentní stejnosměrnou složkou, přičemž amplituda tohoto asymetrického zkratu nepřevyšuje ani dvojnásobek amplitudy symetrického zkratu. Názornější výsledky však dostaneme vyjádřením v poměrných jednotkách.

Pro objektivní srovnávání volíme za vztažnou jednotkovou hodnotu dané veličiny hodnotu při symetrickém zkratu, ostatní hodnoty snížíme dle této úměrnosti. Z rovnice pro limitní strmost zotaveného napětí ze strany sítě vidíme lineární závislost mezi $(di/dt)_{t_0}$ a $(du_{zn}/dt)_{t_0}$.

Pro vyjádření vztahu pro strmost napětí ze strany vypínače v poměrných jednotkách je možné zanedbat hodnoty v čitateli a vztah považovat za úměrný převrácené hodnotě m -té mocnině strmosti proudu, kde m odpovídá koeficientu uvedeného v kapitole 5.2.3, různý pro model Cassieho a Mayrův.

Výsledný vztah pak bude následující:

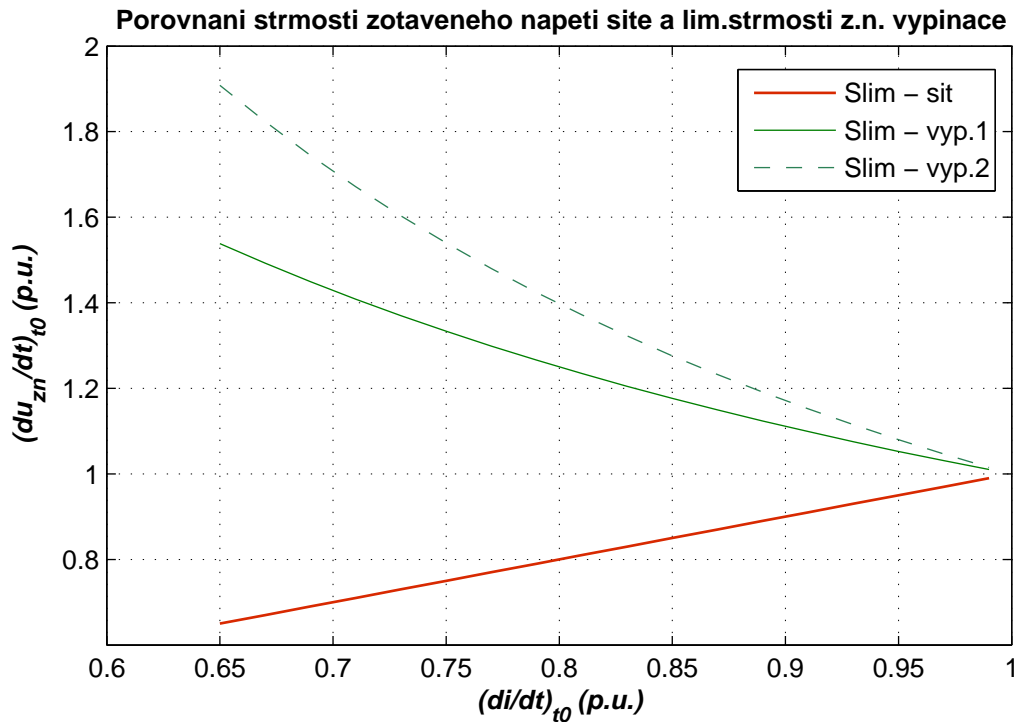
$$s_{lim(PU)} = \frac{1}{\left(\frac{di}{dt}\right)^m} \quad (5.5)$$

Ss. složka [%]	t_0 [-]	$(di/dt)_{t_0}$ [-]	$(du_{zn}/dt)_{t_0}$ [-]	Namáhání vypínače [-]	s_{lim1} [-]	s_{lim2} [-]
100	1,773	0,6927	0,6927	0,4798	1,4431	1,7348
67	1,57	0,7704	0,7704	0,5935	1,2970	1,4786
50	1,44	0,8559	0,8559	0,7326	1,1671	1,2629
33	1,3	0,9342	0,9342	0,8727	1,0704	1,1071
0	1	1	1	1	1	1

Tab. 5.7: Porovnání výsledků v poměrných jednotkách

Vidíme, že použitím Cassieho předpokladů odvození limitní strmosti zotaveného napětí garantovanou vypínačem (čili, že $m = 1$, poslední sloupec v tabulce) bychom dosáhli o 9 až 20% vyšší vypínací schopnost z hlediska u_{zn} než použitím Mayrových. Ve skutečnosti se uplatňují Cassieho i Mayrovy mechanismy, takže se bude skutečná hodnota nacházet mezi nimi. Protože je v interakčním intervalu rozhodující právě Mayrova teorie, je dobré přisuzovat větší význam šestému sloupci tabulky, který tvoří dolní hranici limitní strmosti dané vypínačem.

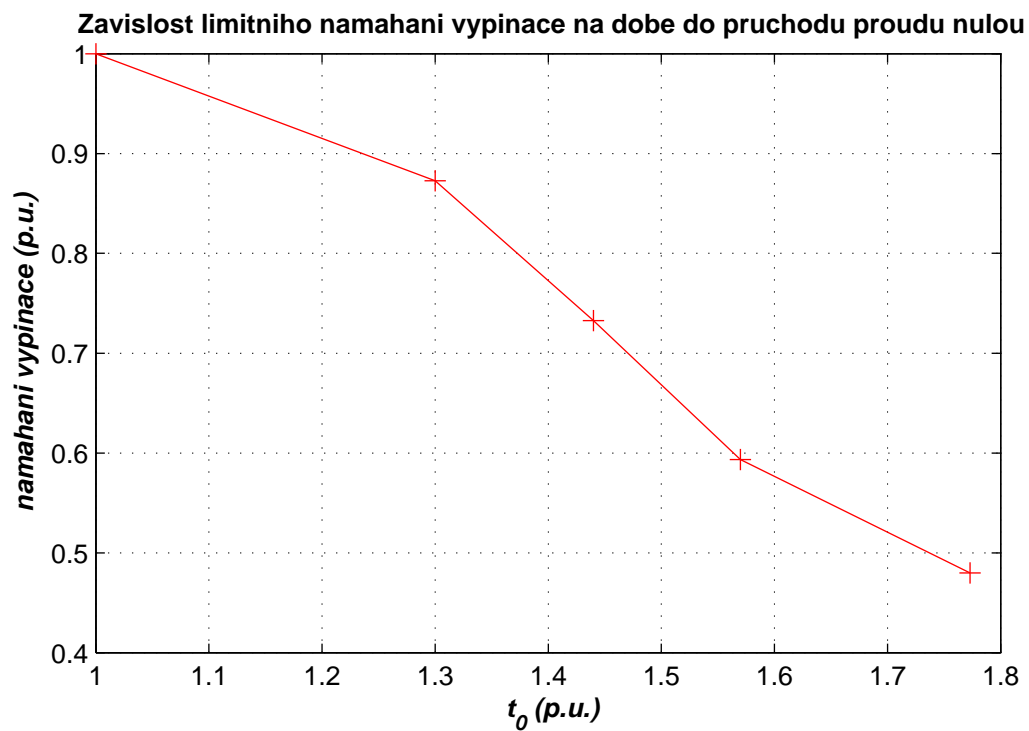
Závislost mezi $(di/dt)_{t_0}$, (du_{zn}/dt) a s_{lim} je uvedena na následujícím obrázku.



Obr. 5.7: Porovnání výsledků v poměrných jednotkách

Z obrázku je patrné, že při asymetrickém zkratu nám vypínač garantuje nejvyšší možnou vypínací schopnost z hlediska závislosti $(du_{zn}/dt)_{t_0}$ na $(di/dt)_{t_0}$. Je však nutné podotknout, že pokud vlivem asymetrie dojde k posunutí prvních proudových nul nad časovou osu, ztratí tento fakt na své relevanci a k průchodu proudu nulovou hodnotou dojde až po ukončení ITI, kdy již vypínací schopnost zanikla.

Na posledním obrázku je vyznačena závislost mezi daným namáháním vypínače na době, ve které k tomuto namáhání dochází. Pro bezpečný chod vypínače je nutné, aby se daná křivka nacházela pod křivkou vypínací schopnosti.



Obr. 5.8: Závislost limitního namáhání vypínače na době do průchodu proudu nulovou hodnotou pro dané uspořádání (t_0 je poměrná doba od vzniku zkratu do průchodu proudu nulou a respektuje asymetrii: $t_0 = 1$ pro symetrický zkrat a $t_0 = 1,77$ pro plnou asymetrii)

6

Závěr

6.1 Vyhodnocení výsledků práce

Analýza asymetrických zkratových proudů je jedinečnou platformou pro zhodnocení vlivu různých parametrů, kterými síť ovlivňuje vypínací proces, a pro uvedení do problematiky narušeného vypínání. Zatímco maximální hodnoty symetrických zkratových proudů dosahují nejnižších hodnot, namáhání vypínače je při průchodu proudem nulovou hodnotou největší. Je zde tedy kladen požadavek na dostatečně vysokou vypínací schopnost. U asymetrických zkratů naopak maximální hodnoty dosahují až dvojnásobných hodnot, přičemž s rostoucí asymetrií klesá namáhání vypínače při průchodu proudem nulou. Zároveň se prodlužuje doba do tohoto průchodu nulou. Odtud je zřetelný požadavek na dostatečnou dobu trvání maximální vypínací schopnosti. Tento požadavek však ve velké míře zvyšuje požadavky na celkovou technologii daného vypínače. Je tedy na každém konstruktérovi, kde určí objektivní hranici mezi bezpečností, technologickými požadavky a ekonomickými aspekty daného celku.

6.2 Možnosti navazující práce

Po provedených analýzách je možná různá aplikace poznatků - lze studovat ojedinělé havárie vypínačů, navrhnout charakteristickou vypínací schopnost dle nových požadavků či stanovit spolehlivost v závislosti na elektrických a mechanických parametrech. Rovněž je vhodné analyzovat spektrum parametrů sítě a vypínače a možný případ narušeného vypínání v konkrétních situacích. V této aplikaci lze za využití výpočetní techniky vytvořit počítačový model pro daná uspořádání.

Literatura

- [1] BÁRTA, K., VOSTRACKÝ, Z. a kol. *Spínací přístroje velmi vysokého napětí* Praha: SNTL/ALFA, 1983.
- [2] RUSŇÁK, Š., ŘEZÁČEK, P. *Elektrické přístroje 1* Plzeň: ZČU v Plzni, 2001
- [3] JEŽEK, V. *Analýza vypínacího procesu generátorového vypínače* Doktorská disertační práce, ZČU v Plzni, 2011
- [4] SEDLÁČEK, J. *Stacionární a dynamické napěťové namáhání vypínačů vn a vvn* Doktorská disertační práce, ZČU v Plzni, 1999
- [5] HEISING, C. R. *Worldwide Reliability Surveys of High Voltage Circuit Breakers* IEEE Power Engineering Review, Paříž, 1995
- [6] FILHO, J. M. O. *Brazilian Blackout 2009* PAC Magazine, p. 36-37, 2010
- [7] VOSTRACKÝ, Z. *Charakteristiky vypínací schopnosti vypínačů a jejich užití v praxi* Doktorská disertační práce, ČVUT Praha, FEL - Škoda, Plzeň, 1986
- [8] SEDLÁČEK, J. *Přednášky z předmětu KEE/EPRE*, FEL ZČU v Plzni, 2011
- [9] LAURENC, J. *Přednášky z předmětu KEE/TVN*, FEL ZČU v Plzni, 2011

Příloha A

Použité skripty a funkce

A.1 Funkce asymzkratsymbolic.m

```
1
2 %SYMBOLICKY ZKR.PROUDY
3 %.....
4 clear;
5 clc;
6
7 syms i Im w x fi R L;
8 R=9.6; L=0.6; w=314; Im=sqrt(2)*40000; fi=pi/2;
9 ss_slozka = Im*exp((-R/L)*x)*sin(fi);
10 i=Im*((sin((w*x)-fi))+(exp((-R/L)*x)*sin(fi)));
11
12 di=diff(i,x);
13
14 h=figure; % h je figura
15 o=axes; % o jsou osy
16 j=ezplot(ss_slozka, [0 0.25]); grid on; hold on; % j je graf ss slozky
17 k=ezplot(i,[0 0.25]); % k je graf zkratoveho proudu
18
19
20 set(h,'Color',[1 1 1],'Position',[100 100 700 240],'Name',...
21 ['Prubeh zkratoveho proudu (' num2str((fi/(pi/2))*100),'% ss slozka)']);
22 set(k,'Color',[.8 .1 .1],'DisplayName','Asymetrie')
23 set(j,'Color',[.1 .1 .8],'DisplayName','Ss.slozka','LineStyle','--')
24 set(o,'XColor',[0 0 0], 'YColor',[0 0 0],'GridLineStyle',':');
25 xlabel('\bf\itt (s)', 'Color',[0 0 0])
26 ylabel('\bf\itI (A)', 'Color',[0 0 0])
27 title(['\bfPrubeh zkratoveho proudu (' num2str((fi/(pi/2))*100),'% ss slozka)'])
28
```

A.2 Funkce dpzk.m

```

1
2 function [di du_sit du_v1 du_v2 dipu du_sitpu du_v1pu du_v2pu] = dpzk(t090,t060,t045,t030,t00)
3 % Vypocet derivace proudu pri pruchodu nulou v case t0
4 % parametry fce jsou t0xx, kde xx je faz.posuv proudu,
5 % kdy vznikne zkrat (je to (fi/pi)*100procentni asymetrie)
6 % Im, R, L, f, w jsou konstanty z hlediska reseneho obvodu
7 % t0xx musime ziskat ze skriptu asymzkratyzsmbolic
8 % -----
9
10 Im=sqrt(2)*40000; R=9.6; L=0.6; f=50; w=2*pi*f; Z=450; %sqrt(R^2+(w*L)^2);
11
12 %derivativei=Im*(2*pi*f*cos((2*pi*f*t0)-fi)-(exp((-R/L)*t0)*(R/L)*sin(fi)));
13 di90 = Im*(w*cos((w*t090)-(pi/2))-(exp((-R/L)*t090)*(R/L)*sin(pi/2)));
14 di60 = Im*(w*cos((w*t060)-(pi/3))-(exp((-R/L)*t060)*(R/L)*sin(pi/3)));
15 di45 = Im*(w*cos((w*t045)-(pi/4))-(exp((-R/L)*t045)*(R/L)*sin(pi/4)));
16 di30 = Im*(w*cos((w*t030)-(pi/6))-(exp((-R/L)*t030)*(R/L)*sin(pi/6)));
17 di0 = Im*(w*cos((w*t00))-(exp((-R/L)*t00)*(R/L)*sin(0)));
18
19 % ZOTAVENE NAPETI ZE STRANY SITE
20 du190=-2*pi*Z*di90*sqrt(2);
21 du160=-2*pi*Z*di60*sqrt(2);
22 du145=-2*pi*Z*di45*sqrt(2);
23 du130=-2*pi*Z*di30*sqrt(2);
24 du10=-2*pi*Z*di0*sqrt(2);
25
26 % ZOTAVENE NAPETI ZE STRANY VYPINACE
27 du290 = 1/((abs(di90))^(3/2));
28 du260 = 1/((abs(di60))^(3/2));
29 du245 = 1/((abs(di45))^(3/2));
30 du230 = 1/((abs(di30))^(3/2));
31 du20 = 1/((abs(di0))^(3/2));
32
33 du390 = 1/(di90);
34 du360 = 1/(di60);
35 du345 = 1/(di45);
36 du330 = 1/(di30);
37 du30 = 1/(di0);
38
39 di=[di90,di60,di45,di30,di0];
40 du_sit=[du190,du160,du145,du130,du10];
41 du_v1=[du290, du260, du245, du230, du20];
42 du_v2=[du390, du360, du345, du330, du30];
43
44 %DO POMERNYCH HODNOT
45 dipu=(1/di0)*[di90 di60 di45 di30 di0];
46 du_sitpu=(1/du10)*[du190 du160 du145 du130 du10];
47 du_v1pu=(1/du20)*[du290 du260 du245 du230 du20];
48 du_v2pu=(1/du30)*[du390 du360 du345 du330 du30];
49 end
50

```