



Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Spolehlivost vypínačů VVN včetně mimořádných stavů

Nestandardní případy vypínání zkratů – interakce elektrických
a mechanických dějů

Autor práce: Bc. Vladimír VAJNAR

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

Plzeň 2014

Abstrakt

VAJNAR, Vladimír. *Spolehlivost vypínačů VVN včetně mimořádných stavů [Reliability of high voltage circuit breakers including special conditions]*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí práce: Zdeněk VOSTRACKÝ

Diplomová práce je zaměřena na zhodnocení problematiky výskytu narušeného vypínání v elektrizačních soustavách v závislosti na parametrech synchronních generátorů a parametrech zkratového obvodu. V práci je provedena analýza vypínacího procesu generátorového vypínače a zpracovaný průzkum spolehlivosti vysokonapěťových vypínačů, včetně provozních výsledků. Rovněž jsou stanoveny závěry, jak tuto spolehlivost ovlivňuje chování vypínačů v mezních stavech (vypínání v limitních oblastech vypínací charakteristiky), k čemuž dochází při vypínání asymetrických zkratů.

Tato diplomová práce je součástí širšího celku zkoumání narušeného vypínání nazvaného *Nestandardní případy vypínání zkratů – interakce elektrických a mechanických dějů*.

Klíčová slova

vypínač, synchronní stroj, asymetrický zkrat, narušené vypínání, spolehlivost

Abstract

VAJNAR, Vladimír. *Reliability of high voltage circuit breakers including special conditions* [Spolehlivost vypínačů VVN včetně mimořádných stavů]. Pilsen, 2014. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electric power engineering and Ecology. Supervisor: Zdeněk VOSTRACKÝ

This diploma thesis is focused on evaluation of interrupted switching in power systems in dependence on parameters of synchronous generators and short-circuits. The switching process of generator circuit breaker is analyzed in the paper, also the reliability survey is made including practical knowledge. Thesis also determines conclusions how is the reliability affected by behavior of circuit breaker in limitary states (switching in limitary areas of switching characteristics), which occurs when asymmetrical faults are cleared.

This diploma thesis is a part of greater topic focused on interrupted breaking called *Special cases of short-circuits switching – electrical and mechanical interaction*.

Keywords

circuit breaker, synchronous machine, asymmetrical fault, interrupted switching, reliability

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové 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 zákoníku č. 40/2009 Sb.

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

V Plzni dne 4. května 2014

Bc. Vladimír VAJNAR

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Zdeňkovi Vostrackému, DrSc., Dr.h.c. za jeho přístup, odborné rady a metodické pokyny, které vedly k vypracování této diplomové práce. Rovněž děkuji své rodině za jejich nekončící podporu během mého studia.

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Seznam symbolů a zkratk	x
1 Úvod	1
2 Teorie spolehlivosti v elektroenergetice	2
2.1 Základní spolehlivostní ukazatele, pojmy a definice	2
2.1.1 Řazení poruch	4
2.1.2 Vanová křivka	5
2.1.3 Citlivostní analýza	6
2.2 Spolehlivostní parametry zařízení vvn/zvn	7
2.2.1 Typy poruch vypínačů vvn	7
2.2.2 Kritéria ovlivňující spolehlivost vypínačů	8
2.3 Poznatky z provozní praxe	10
2.3.1 Výsledky mezinárodních průzkumů	10
2.3.2 Důležité závěry z provedených průzkumů	14
3 Zkratové proudy a jejich vypínání	15
3.1 Symetrický zkratový proud	17
3.2 Asymetrický zkratový proud	17
3.3 Vypínací proces	19
3.3.1 Silnoprůdný interval	19
3.3.2 Interakční interval	20
3.3.3 Dielektrický interval	20
3.4 Zotavené napětí	20
3.5 Elektrický spínací oblouk	22
3.5.1 Stacionární oblouk	22
3.5.2 Dynamický oblouk	23
3.5.3 Cassieho teorie oblouku	24
3.5.4 Mayrova teorie oblouku	25

3.6	Vypínací interval	26
4	Generátorový zkrat	27
4.1	Zavedení Parkovy transformace	27
4.2	Třífázový zkrat statorového vinutí	28
4.2.1	Průběh přechodného děje	28
4.2.2	Průběh zkratového proudu ve statorovém vinutí	31
4.2.3	Popis jednotlivých složek	31
5	Požadavky na vypínací schopnost	35
5.1	Požadovaná vypínací schopnost v interakčním intervalu	35
5.2	Vypínací schopnost tlakovzdušných vypínačů	36
5.3	Vypínací schopnost vakuových vypínačů	38
5.4	Vypínací schopnost vypínačů s plynem SF6	39
5.5	Generátorový vypínač	42
5.6	Problematika narušeného vypínání	43
6	Namáhání vypínače při generátorových zkratech	44
6.1	Parametry zkoumaných generátorů	44
6.2	Namáhání vypínače při vypínání	46
6.2.1	Derivace zkratového proudu	47
6.2.2	Zotavené napětí generované obvodem	47
6.2.3	Porovnání dosažených výsledků	49
6.3	Závěry vyplývající z teoretického modelu	56
7	Modelování soustavy s generátorovým vypínačem	57
7.1	Metodika modelování částí soustavy	57
7.2	Model generátorového vypínače	58
7.2.1	Třífázový generátorový zkrat	58
7.2.2	Jednofázový generátorový zkrat	60
7.3	Modelování části soustavy s vypínačem	62
7.3.1	Třífázový zkrat na přípojnicích	64
7.3.2	Jednofázový zkrat na přípojnicích	68
8	Závěr	71
	Reference, použitá literatura	72
	Přílohy	74
	A Průběhy zkratových proudů (kap. 6)	74
	B Schémata modelů	79

Seznam obrázků

2.1	Sériové řazení prvků	4
2.2	Paralelní řazení prvků	5
2.3	Ilustrační vanová křivka	6
2.4	Předpokládaná a skutečná závislost maximálního počtu sp. cyklů na zatě- žování vypínače	9
2.5	Typ pohonu vypínačů v jednotlivých průzkumech	12
2.6	Účel zkoumaných vypínačů v ES	12
3.1	Ilustrační příklad symetrického zkr. proudu	17
3.2	Ilustrační příklad asymetrického zkr. proudu	18
3.3	Náhradní obvody pro stanovení průběhu zotaveného napětí	21
3.4	Náčrt oblouku s vyznačenými klíčovými parametry	22
3.5	Časová posloupnost vypínacího procesu vypínače SF6	26
4.1	Přechodné složky způsobené stejnosměrnou složkou ve statoru	30
4.2	Přechodné složky způsobené stejnosměrnou složkou v rotoru	30
4.3	Průběh zkr. proudu ve statorovém vinutí - odeznění přech. děje	32
4.4	Ustálená složka zkratového proudu	32
4.5	Přechodná složka zkratového proudu	33
4.6	Rázová složka zkratového proudu	33
4.7	Stejnoseměrná složka zkratového proudu	34
5.1	Řez tlakovzdušným vypínačem, dvě zhášedla v sérii, 3 - pevné kontakty, 4 - pohyblivé kontakty, 5 - nosný izolátor, 10 - zhášecí odpor. Převzato z [14] . . .	37
5.2	Vakuové zhášedlo z mědi a chromu používané ve vypínačích řady W-VACi, vyvinuté firmou Eaton. Převzato z [16] 	38
5.3	Tepelná vodivost fluoridu sírového (SF6) a dusíku (N2) v závislosti na teplotě. Převzato z [1] 	40
5.4	Průběh teplot oblouku v závislosti na poloměru (křivky 1 až 4 jsou pro různé hodnoty proudu). Převzato z [1] 	41
5.5	Generátorový vypínač typ HECS-130XXLp výrobce ABB. Převzato z [19] . . .	43

6.1	Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 0^\circ$, s vyznačenou ss. složkou	46
6.2	Průběh zotavených napětí generátorového vypínače pro jedn. druhy zkratu [Převzato z [18]]	48
6.3	Závislost RRRV na velikosti asymetrie ($\alpha_0 = 0^\circ$ pro plný asym. zkrat, $\alpha_0 = 90^\circ$ pro symetrický)	49
6.4	Závislost doby prvního průchodu nulou jako funkce asymetrie (úhlu α_0) . .	52
6.5	Závislost namáhání vypínače jako funkce doby prvního průchodu nulou . .	53
6.6	Závislost namáhání vypínače jako funkce asymetrie (úhlu α_0)	54
6.7	Závislost poměrné doby do průchodu nulou a poměrného namáhání vypí- nače na velikosti asymetrie (vztaženo k symetrickému proudu)	55
7.1	Schéma obvodu s generátorovým vypínačem	58
7.2	Výsledné průběhy pro plnou asymetrii fáze C	58
7.3	Výsledné průběhy pro plnou asymetrii fáze B	59
7.4	Výsledné průběhy pro plnou asymetrii fáze B se zahrnutím odporu oblouku	59
7.5	Výsledné průběhy zkratu fáze B bez zahrnutí odporu poruchy	60
7.6	Výsledné průběhy zkratu fáze A bez zahrnutí odporu poruchy	60
7.7	Výsledné průběhy zkratu fáze B se zahrnutím odporu poruchy	61
7.8	Výsledné průběhy zkratu fáze A se zahrnutím odporu poruchy	61
7.9	Schéma řešené sítě	62
7.10	Průběhy proudů při 3f zkratu v čase $t = 1,06 s$	64
7.11	Průběhy proudů při 3f zkratu v čase $t = 1,064 s$	65
7.12	Průběhy proudů při 3f zkratu v čase $t = 1,068 s$	66
7.13	Průběhy proudů při 3f zkratu v čase $t = 1,068 s$ se zahrnutím odporu oblouku	67
7.14	Průběhy proudů při 1f zkratu fáze B v čase $t = 1,066 s$	69
7.15	Průběhy proudů při 1f zkratu fáze C v čase $t = 1,068 s$	70
A.1	Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 10^\circ$	74
A.2	Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 20^\circ$	75
A.3	Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 30^\circ$	75
A.4	Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 40^\circ$	76
A.5	Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 50^\circ$	76
A.6	Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 60^\circ$	77
A.7	Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 70^\circ$	77
A.8	Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 80^\circ$	78
A.9	Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 90^\circ$	78
B.1	Schéma modelu pro simulaci generátorového zkratu	79
B.2	Schéma modelu pro simulaci části soustavy s vypínačem	80

Seznam tabulek

2.1	Procentní podíl MF/mf v jednotlivých průzkumech	11
2.2	Procentní podíl jednotlivých původů poruch v rámci II. průzkumu CIGRE	11
2.3	Původ všech událostí s procentuálním zastoupením	13
3.1	Přibližná četnost výskytu zkratů [7]	15
3.2	Přibližné počty poruch dle příčiny [7]	16
3.3	Hodnoty počáteční strmosti u_{zn} pro různé hodnoty proudu $I_v = 40 kA$ vypínače SF6	21
3.4	Časová posloupnost vypínacího procesu vypínače SF6	26
5.1	Výhody a nevýhody tlakovzdušných vypínačů	37
6.1	Parametry turboalternátoru Pruněřov 110 MW	45
6.2	Parametry hydroalternátoru Dalešice 115 MW	45
6.3	Porovnání výsledků pro turboalternátor	50
6.4	Porovnání výsledků pro hydroalternátor	51
7.1	Parametry sítě	63
7.2	Srovnání výsledků pro 1f zkrat na přípojnicích	68

Seznam symbolů a zkratek

ε	Obecná náhodná veličina.
$R(t)$	Pravděpodobnost bezporuchového provozu v časovém intervalu $(0; t)$.
$Q(t)$	Pravděpodobnost poruchy v časovém intervalu $(0; t)$.
$f(t)$	Hustota pravděpodobnosti $[s^{-1}]$.
$\lambda(t)$	Intenzita poruch $[s^{-1}]$.
MTTF	Mean time to failure. Střední čas do poruchy.
MTBF	Mean time between failures. Střední čas mezi poruchami.
CBY	Circuit-breaker-years. Vypínač-roky.
MF	Major failure. Porucha.
mf	Minor failure. Závada.
RCM	Reliability centered maintenance. Spolehlivostně orientovaná údržba.
CIGRE	Conseil international des grands réseaux électriques. Světová profesní asociace elektroinženýrů.
SF6	Fluorid sírový.
ITI	Interrupting time interval. Interval plné vypínací schopnosti.
f	Frekvence $[Hz]$.
ω	Úhlová frekvence $[rad/s]$.
Z_0	Vlnová impedance $[\Omega]$.
I_v	Vypínaný proud $[kA]$.
i_a	Proud protékající obloukem $[kA]$.
u_{zn}, u_{ob}, u_a ..	Zotavené, obnovené, obloukové napětí $[V]$.
G	Vodivost obloukového sloupce $[S]$.
Q	Tepelný obsah obloukového sloupce $[kJ]$.
P_z	Tepelné ztráty (chlazení) oblouku $[kW]$.
τ	Časová konstanta oblouku $[s]$.
z_k	Zdvih kontaktů $[mm]$.
$d, q, 0$	Podélná, příčná a nulová osa.
A, B, C	Označení fází třífázového systému.
x_d, x'_d, x''_d ...	Podélná synchronní, přechodná a rázová reaktance $[p.u.]$.
T_d	Synchronní časová konstanta v podélné ose $[s]$.
T'_d	Časová konstanta přechodné složky v podélné ose $[s]$.
T''_d	Časová konstanta rázové složky v podélné ose $[s]$.

$x_q, x'_q, x''_q \dots$	Příčná synchronní, přechodná a rázová reaktance [<i>p.u.</i>].
$T_q \dots\dots\dots$	Synchronní časová konstanta v příčné ose [<i>s</i>].
$T'_q \dots\dots\dots$	Časová konstanta přechodné složky v příčné ose [<i>s</i>].
$T''_q \dots\dots\dots$	Časová konstanta rázové složky v příčné ose [<i>s</i>].
$T_a \dots\dots\dots$	Časová konstanta statorového vinutí [<i>s</i>].
$R \dots\dots\dots$	Činný odpor [Ω].
$R_f \dots\dots\dots$	Činný odpor budicího vinutí [Ω].
$\alpha_0 \dots\dots\dots$	Úhel natočení mezi podélnou osou stroje a osou statorového vinutí [$^\circ$].
$Q_i \dots\dots\dots$	Požadovaná vypínací schopnost v interakčním intervalu.
$Q_{TLV} \dots\dots\dots$	Vypínací schopnost tlakovzdušných vypínačů.
$\theta_d \dots\dots\dots$	Disociační teplota [<i>K</i>].
$\theta_z \dots\dots\dots$	Zápalná teplota [<i>K</i>].
RRRV $\dots\dots\dots$	Rate rise of recovery voltage. Počáteční strmost zotaveného napětí

1

Úvod

Málokteré odvětví v elektroenergetické praxi zaznamenalo za uplynulých několik dekád takový vývoj jako spínací technika. Od zhasnutí natlakovaným vzduchem, přes využití oleje až po několik generací vypínačů s plynem SF₆. Všechny tyto typy vypínačů plně reflektovaly tehdejší aktuální požadavky pro úspěšné vypnutí. Primárně se vývoj věnoval zejména navyšování vypínací schopnosti. V uplynulých několika letech se však analyzovaly havárie, kdy vypínače nevypnuly ani malé parametry, i přes to, že vyhovovaly normě. Tím se do popředí zájmu dostala i časová závislost vypínací schopnosti.

Výzkumy těchto havárií ukázaly, že k takovým případům dochází při vypínání v krajních oblastech mechanického pohybu kontaktů, kdy klesá rychlost proudění plynu, což se projeví ztrátou vypínací schopnosti. Nulová hodnota proudu, ve které vypínače zpravidla vypínají, tak přijde v okamžiku, kdy není zajištěno dostatečné chlazení a spínací oblouk tak hoří až do další proudové nuly. V takových případech dochází k celkové destrukci vypínače a protékající proud musí přerušit nadřazený ochranný prvek.

Mezním případem je tzv. *narušené vypínání*, což je označení pro běžné provozní spínání, během něhož nahodile dojde ke vzniku zkratu. Probíhá spínací proces, během něhož dojde ke změně vypínaných parametrů. Oddalující se kontakty a nedostatek natlakovaného plynu tak způsobí nevypnutí zkratového proudu.

Jedinečnou platformou pro zhodnocení výskytu narušeného vypínání a časové závislosti vypínací schopnosti je analýza asymetrie zkratových proudů. Obvod tak průběhem zkratových proudů definuje okolnosti, za jakých bude docházet k vypnutí a stanovuje intervaly mezi jednotlivými průchody proudu nulou. Úkolem této práce je částečně analyzovat rozdílné vlivy asymetrických zkratů, prozkoumat nutnost prodloužení potřebné vypínací schopnosti a odvodit potřebné intervaly vypínání, které budou vyhovovat i zmíněným podmínkám narušeného vypínání. Toto je i současným tématem v komisích CIGRE či IEEE, případně jednotlivých výrobců. V současném tržním prostředí však výrobci výsledky svých zkoušek nezveřejňují a je tak obtížné získat aktuální údaje z vývoje nových technologií či výsledků provedených zkoušek.

2

Teorie spolehlivosti v elektroenergetice

2.1 Základní spolehlivostní ukazatele, pojmy a definice

Spolehlivost je v inženýrské praxi chápána jako obecná vlastnost zkoumaného objektu plnit požadované funkce při dodržení hodnot stanovených provozních parametrů v daných mezích a v daném čase dle stanovených technických podmínek. Spolehlivost je komplexní vlastnost, která je definována dílčími zkoumanými vlastnostmi. Těmi může být např. bezporuchovost, bezpečnost, životnost či udržitelnost. [2]

Bezporuchovost je schopnost zkoumaného objektu plnit nepřetržitě požadované funkce po stanovenou dobu a za stanovených podmínek. Pro její kvantitativní vyjádření používáme např. pravděpodobnost bezporuchového provozu, intenzitu poruch či střední dobu bezporuchového provozu.

Bezpečnost je obecná vlastnost zařízení neohrožovat lidské životy či životní prostředí při plnění požadovaných funkcí. Pro její posouzení využíváme apriorně či posteriorně stanovených pravděpodobností výskytu nebezpečné poruchy v daném intervalu či intenzity výskytu nebezpečných poruch.

Životnost je schopnost objektu plnit požadované funkce do dosažení mezního stavu při stanoveném systému předepsané údržby. Kvantitativně je vyjádřena středním technickým životem nebo střední dobou do poruchy.

Udržitelnost je vlastností objektu, která spočívá ve způsobilosti k předcházení poruch vykonáváním spolehlivostně orientované předepsané údržby. Nejčastěji bývá (např. v Markovových modelech) zhodnocena střední dobou údržby nebo intenzitou údržby.

V teorii spolehlivosti se uvažují pouze náhodné poruchy, které vznikají bez zjevných předchozích příčin. Ostatní poruchy, které lze vysvětlit a předpovědět podle jiných závislostí, nejsou náhodné. Podle souvislosti s jinými poruchami se poruchy dělí na *nezávislé* a *závislé*. Závislá porucha vzniká následkem poruchy jiného prvku, nezávislá nikoliv. Ve spínací technice jde z větší části o závislé poruchy – na spolehlivost vypínače jako komplexního prvku je nutné nahlížet tak, aby v celém spektru byly obsaženy všechny dílčí problémy (elektrický, mechanický, termodynamický systém, izolace, ...).

Podle doby trvání se rozlišují poruchy *trvalé* a poruchy *dočasné*. Trvalou poruchu je možné odstranit pouze opravou nebo náhradou porouchaného prvku, dočasné poruchy mohou samovolně vymizet nebo trvají jen po dobu působení vnějšího vlivu.

Základním ukazatelem spolehlivosti (bezporuchovosti) neobnovovaných systémů je pravděpodobnost bezporuchového provozu a z ní dále odvozené veličiny: pravděpodobnost poruchy, hustota pravděpodobnosti poruchy a intenzita poruch. Všechny tyto veličiny stejně dostatečně popisují spolehlivost (pravděpodobnost poruchy) a z každé z nich lze odvodit zbývající. Ukazatele spolehlivosti sledujeme v závislosti na veličinách, které právě spolehlivost ovlivňují nejvíce. Obecně tímto uvažujeme čas, ve spínací technice např. počet spínacích cyklů, v automobilovém průmyslu např. počet ujetých *km*.

Pravděpodobnost bezporuchového provozu je pravděpodobnost, že porucha nenastane v časovém intervalu $(0; t)$. Pravděpodobnost bezporuchového provozu značíme písmenem R a je předepsána jako:

$$R(t) = P(\varepsilon > t) \quad [-] \quad (2.1)$$

ε představuje náhodnou veličinu (např. dobu do poruchy v čase t)

Pravděpodobnost poruchy je pravděpodobnost, že porucha v časovém intervalu $(0; t)$ nastane. Platí:

$$Q(t) = P(\varepsilon < t) = 1 - R(t) \quad [-] \quad (2.2)$$

Vidíme, že funkce $R(t)$ a $Q(t)$ jsou vzájemným doplňkem do 1. $Q(t)$ je neklesající funkce náhodné veličiny, $R(t)$ je nerostoucí funkce náhodné veličiny. Obě funkce jsou kladná bezrozměrná čísla v intervalu $(0; 1)$. Zpravidla předpokládáme, že $R(0) = 1$ a $R(\infty) = 0$.

Hustota pravděpodobnosti poruchy (příp. hustota poruch) je vázaná k příslušné distribuční funkci $Q(t)$.

$$f(t) = \frac{Q(t)}{dt} \quad [s^{-1}] \quad (2.3)$$

Intenzita poruch je poměrem mezi hustotou poruch a pravděpodobností bezporuchového provozu. Její hodnota nám udává počet poruch v závislosti na diskrétní náhodné veličině.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad [s^{-1}] \quad (2.4)$$

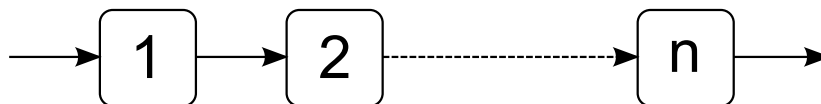
Další velmi často užívanou veličinou je střední doba do poruchy (v angl. literatuře označována jako MTTF – mean time to failure). Udává nám očekávaný čas, při němž dojde k poruše. Pro jeho stanovení je potřeba velké množství statistických dat. Jeho obdobou a v praxi mnohem více užívanější je pro obnovované (opravované) objekty či systémy střední doba mezi poruchami (MTBF – mean time between failures). Je to očekávaná doba mezi navzájem nezávislými poruchami při běžném provozu objektu. Při určování MTBF se předpokládá, že porouchaný objekt se okamžitě opravuje. Z ekonomických požadavků na spolehlivý systém vyplývá, že MTBF je jedním z nejsledovanějších parametrů a čím vyšší hodnota, tím bude objekt spolehlivější a méně náročnější na údržbu či opravu.

$$MTBF = \theta(t) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (2.5)$$

2.1.1 Řazení poruch

Závisí-li spolehlivost daného systému na spolehlivosti jeho dílčích objektů, pak spolehlivostní model tohoto systému odpovídá určitému zapojení těchto prvků (i přes to, že fyzické zapojení objektů může být odlišné). Zároveň funkce systému může být odlišná a musí odpovídat logickému uspořádání prvků. [2]

Sériové řazení: Je-li bezporuchový chod systému podmíněn bezporuchovým chodem všech jeho dílčích objektů, hovoříme pak o sériovém řazení poruch. Např. máme-li několik spínačů řazených v sérii a funkcí systému je uzavření elektrického obvodu, pak pravděpodobnost bezporuchového provozu systému je součinem pravděpodobností bezporuchového provozu všech jeho prvků.

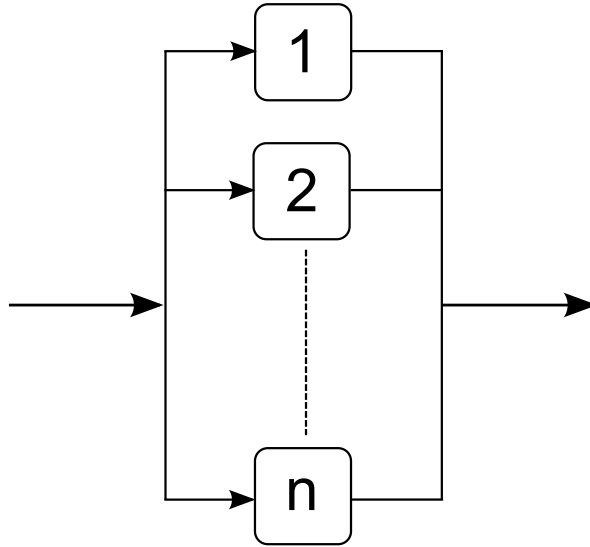


Obr. 2.1: Sériové řazení prvků

Matematicky zapsáno pak pravděpodobnost bezporuchového provozu uvedeného systému je:

$$R_c = R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (2.6)$$

Paralelní řazení: Systém složený z n paralelně zapojených prvků je v poruchovém stavu, jestliže jsou v poruše všechny jeho prvky. Např. přenos informace může být uskutečněn n cestami – informace se nedostane od vstupu k výstupu, pokud jsou všechny přenosové cesty porouchané.



Obr. 2.2: Paralelní řazení prvků

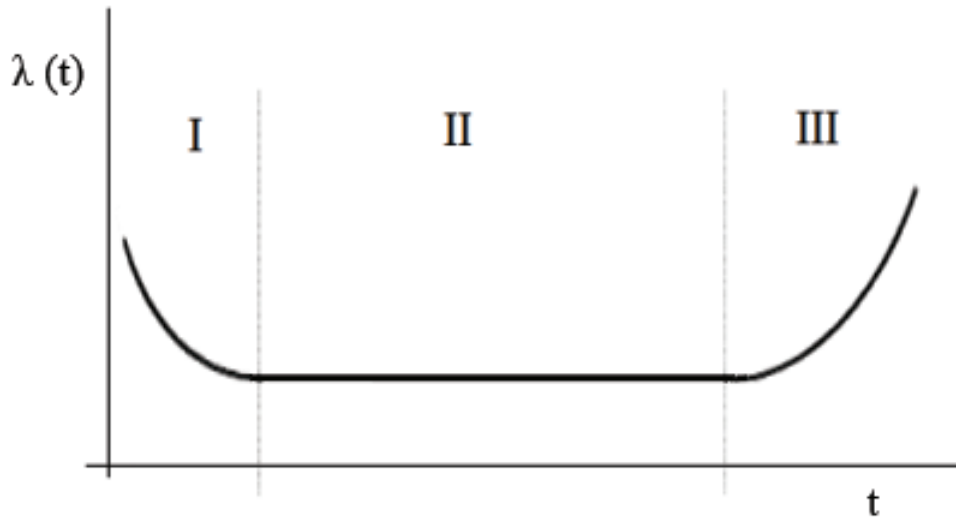
$$Q_c = Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_n = \prod_{i=1}^n Q_i = \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (2.7)$$

$$R_c = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (2.8)$$

2.1.2 Vanová křivka

Jde o často užívaný pojem v teorii spolehlivosti a v technologické optimalizaci života výrobku. Vanová křivka znázorňuje průběh intenzity poruch na čase či jiné náhodné veličině. Vanovou křivku lze rozdělit do třech částí charakterizovaných dílčími vlastnostmi, přičemž každá část odpovídá určité fázi života výrobku.

První období se nazývá období časných poruch (příp. období dětských nemocí, doba zahoření, apod.), ke kterým dochází při uvádění do provozu. Jsou způsobeny výrobními vadami, chybami při montáži, či chybami celkového návrhu daného výrobku. Po odeznění častých poruch po uvedení do provozu se intenzita poruch sníží a zůstává téměř konstantní. V tomto období dochází k poruchám způsobeným vnějšími příčinami či ke zcela nahodilým jevům. Toto období se nazývá období běžného užívání či období technického života a záměrem je, aby bylo co možná nejdelší a intenzita poruch co možná nejnižší. Poté se začne intenzita poruch opět zvyšovat a dochází k poruchám způsobeným degradací materiálů, stárnutím výrobku. Toto období se nazývá období stárnutí. Názorná vanová křivka může mít tvar dle obr. 2.3.



Obr. 2.3: Ilustrační vanová křivka

Vanová křivka je univerzálním nástrojem pro posouzení životnosti každého výrobku, v určité formě je dokonce aplikovatelná na lidský život. Nicméně matematicky je obtížně popsitelná – řeší se každé období zvlášť pomocí daných rozdělení (Weibullovo rozdělení pro oblasti I a III a exponenciální rozdělení pro oblast II). U některých výrobců je možné potlačit období I či III a to například důslednými výstupními kontrolami a časným stažením výrobku z provozu.

2.1.3 Citlivostní analýza

Známe-li obecné vyjádření pravděpodobnosti bezporuchového provozu systému R_S pomocí pravděpodobností jeho dílčích prvků R_i , je možné derivacemi provést tzv. *citlivostní analýzu*, kdy dle velikosti parciálních derivací určujeme prvek s největším dopadem na spolehlivost systému. Pro systém složený z n prvků určíme parciální derivace

$$\frac{\partial R_S}{\partial R_1}, \quad \frac{\partial R_S}{\partial R_2}, \dots, \quad \frac{\partial R_S}{\partial R_n} \quad (2.9)$$

$$\Delta R_S = \frac{\partial R_S}{\partial R_1} \cdot \Delta R_1 + \frac{\partial R_S}{\partial R_2} \cdot \Delta R_2 + \dots + \frac{\partial R_S}{\partial R_n} \cdot \Delta R_n \quad (2.10)$$

Ze vztahu 2.10 lze určit prvek, jehož poruchovost nejvíce ovlivňuje spolehlivost celého systému. Citlivostní analýza se provádí při optimalizaci spolehlivostních modelů, kdy srovnáním parciálních derivací uvedených ve vztahu 2.9 s ekonomickými aspekty každého prvku lze usoudit, zda investice do daného prvku povede k adekvátnímu zvýšení spolehlivosti systému.

2.2 Spolehlivostní parametry zařízení vvn/zvn

Přenosová soustava tvořící páteřní síť pro transfery velkých výkonů na dlouhé vzdálenosti jest spolehlivostně náročným systémem. Pro bezpečné a bezporuchové stavy je nutné zajistit nejen danou kvalitu elektrické energie, ale i správnou funkčnost všech prvků. Elektrizací soustavu je nutné chápat jako dynamický systém, čili provozní veličiny jsou funkcí okamžitých hodnot nastavení řízení či stavu soustavy. Všechny poruchy je tedy nutné řešit jako přechodné děje.

V přenosu elektrické energie jsou klíčovým prvkem elektrické stanice (tedy rozvodny, spínací stanice, transformovny), přičemž elektrická výzbroj každé odbočky čítá od tří až do šesti přístrojů. Každý z těchto přístrojů má rozdílný vliv na spolehlivost odbočky (tedy i vyvedení výkonu), např. porucha měřicího transformátoru napětí přímo neovlivní provoz odbočky, ale při výpadku informace o velikosti napětí může dojít k chybě v řídicím systému. Na druhou stranu porucha vypínače či odpojovače může mít za následek setrvávání vývodu v sepnutém či rozepnutém stavu vzdor nastavení řídicího systému. Z tohoto důvodu je nutné ve vysokonapěťové technice správně definovat a stanovit spolehlivost zařízení.

Nicméně i na problematiku spolehlivosti může mít vliv politická a ekonomická situace daného státu. Tržní hospodářství je postavené na vyrovnání nabídky a poptávky při maximalizaci zisku výrobce, což přímo ovlivní způsob nahlížení na spolehlivost výrobku. V tomto kapitálovém prostředí jsou výrobci nuceni pro vykazování určitého zisku brát zvýšený ohled na spolehlivost. Výrobci tedy musí apriorně stanovit spolehlivost svého produktu, což promítnou do ceny, přičemž je nutné, aby uvedená spolehlivost nebyla nadhodnocena (což by vedlo k nespokojenému zákazníkovi a ztrátě potenciálních dalších zisků) či podhodnocena (což by vedlo k možné ztrátě výrobce při prodeji *pod cenou*).

2.2.1 Typy poruch vypínačů vvn

Jak bylo popsáno výše, poruchou rozumíme ztrátu či omezení schopnosti plnit požadovanou funkci. U složitých vysokonapěťových zařízení mají různé změny od provozních vlastností odlišné vlivy na spolehlivost, proto se odchýlení od provozních vlastností rozděluje na *poruchy* a *závady*. Toto dělení má v teorii spolehlivosti vysokonapěťových systémů výhodný a prověřený význam.

Porucha

Pojem porucha bývá často v mezinárodní sféře nahrazen termínem **major failure** (MF), jež zavedla světová asociace CIGRE při stanovování spolehlivosti vysokonapěťových zařízení. Pod pojmem major failure rozumíme poruchu spínacího nebo řídicího prvku, která má za následek úplnou ztrátu jedné či více fundamentálních funkcí. Následkem major failure je okamžitá změna provozních podmínek a k jejímu odstranění je potřeba záložních

ochranných zařízení. Případně vlivem major failure dojde k nutnému odstavení zařízení z provozu na dobu minimálně 30 minut pro neplánovanou údržbu či obnovu. Stav, ve kterém se část soustavy nachází při odstraňování poruchy se říká výpadek. Příkladem MF je selhání vypínače, kdy nepřeruší proud (viz. dále). [3]

Závada

Závada, častěji nazývána termínem *minor failure* (mf), je případ selhání, které svým rozsahem či následky nespadá pod MF. Dochází jen k částečné ztrátě funkce. Může jít i o kompletní poruchu konstrukční části či podsystému, která nevyústí v MF. Případem mf může být např. částečný únik plynu SF₆ do okolí. Část sítě, kde se na vypínači objevila závada, je možné dále provozovat s naplánovaným odstraněním závady. Odstranění závady vyžaduje odstávku části sítě. [3]

2.2.2 Kritéria ovlivňující spolehlivost vypínačů

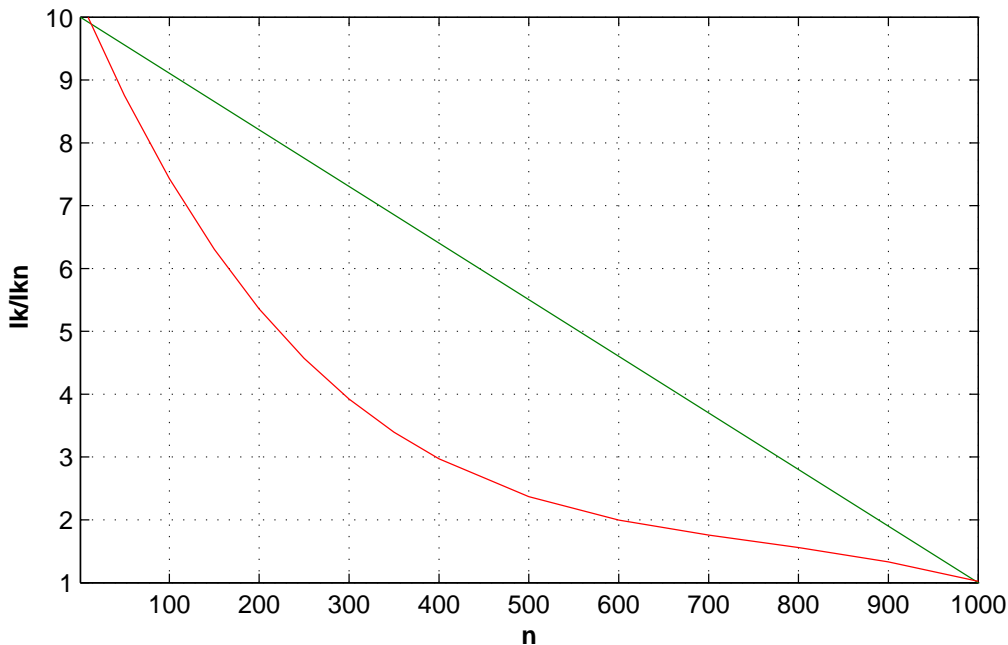
Počet spínacích cyklů

Pro elektrické přístroje není hlavním parametrem čas. Pracujícím elektrickým přístrojem je spíše než vypínačem se sepnutými kontakty rozuměn právě probíhající spínací proces. Tento proces má na spolehlivost vypínače mnohem větší dopad nežli stáří přístroje. Proto je nejužívanější náhodnou veličinou **počet spínacích cyklů** (angl. *operating cycles*), případně počet spínacích cyklů za rok (angl. *operating cycles per year*). Jedním spínacím cyklem rozumíme jedno sepnutí a jedno rozepnutí vypínače. Samozřejmým předpokladem je bezproblémové přenesení proudu v sepnutém stavu, ale každým spínacím procesem dochází k opotřebování všech konstrukčních i funkčních částí přístroje – mechanické, termodynamické a elektrické namáhání kontaktů, mechanické namáhání tlakové nádoby vlivem natlakovaného plynu SF₆, stáří a množství plynu SF₆, mechanické namáhání pohonné jednotky a přenosu energie z pohonu na kontakty, atd.

V současné době je spínací životnost vypínačů SF₆ okolo 10000 spínacích cyklů. Mezinárodně je stanoven minimální počet spínacích cyklů na 2000.

Způsob provozu

Při provozu vypínače dochází k rozdílným namáháním provozními či zkratovými proudy. Vysokonapěťové zařízení je testováno, zda splňuje provozní požadavky, ke kterým bylo vyrobeno. Z ekonomických hledisek vynaložil energetický průmysl značné úsilí pro harmonizaci a standardizaci provozních požadavků, ale ze zkušeností a provozní praxe vyplývá, že nelze absolutně předpovídat podmínky, za jakých bude docházet k vypnutí. Z toho důvodu i velikost vypínaného proudu ovlivní počet spínacích cyklů. Nadměrným zatěžováním vypínací komory (násobky jmenovitého vypínaného proudu) se snižuje daný počet spínacích cyklů.



Obr. 2.4: Předpokládaná a skutečná závislost maximálního počtu sp. cyklů na zatěžování vypínače

Obrázek je ilustrační pro naznačení závislosti mezi násobkem vypínaného zkratového proudu a snížením počtu spínacích cyklů. Zeleně je znázorněn předpokládaný průběh závislosti, který má ve skutečnosti hyperbolický průběh (červený).

V současné době není toto kritérium aktuální, protože pravděpodobnost výskytu plného zkratového proudu je velice nízká a dochází k němu jen zřídka (cca jednou za více než 100 let). Avšak je důležité před samotnou instalací vypínače prozkoumat možné velikosti zkratů v daném místě.

System údržby

Potřeba plánované a efektivní údržby vysokonapěťového zařízení je v přímé ekvivalenci s jeho cenou a důležitostí. Tak jako jsou výrobky pro každodenní užívání v běžném životě závislé na způsobu, jakým se o něj staráme. System údržby byl a stále je vnitřní záležitostí provozovatelů daných zařízení, nicméně podstatná většina z nich je založena na spolehlivostně orientované údržbě (RCM – reliability centered maintenance). Údržba je stav, kdy dané zařízení není schopné plnit svoji funkci, protože je v údržbovém prostoji. Tím snižuje (či omezuje, v závislosti na širším stavu rozvodného systému) celkovou spolehlivost. Cílem RCM je snížit údržbové prostoje na minimum, jde tedy o princip údržby založený na skutečném stavu zařízení, nikoliv na čase či skutečném výskytu poruchy. Ač je system údržby jedním z rozhodovacích kritérií při výběru daného zařízení, musí se provádět revize a kontroly, které jsou však součástí širšího systému údržby (např. revize blokových rozveden při plánovaných odstávkách elektráren).

Z principů RCM vyplývá, že je-li možné provést na zařízení kontrolu, pak by se udělat měla, čímž bude zapadat do systému údržby. Mezi běžnou údržbu patří např. kontrola pohonu či čištění izolátoru. Nespadá-li tato údržba do systému RCM, pak je nutné provádět tyto kontroly (zejména kontroly pohonu) **alespoň jednou za 2 roky**. Absolutně však nelze říci, že spolehlivost vypínačů je pozitivně ovlivněna jakoukoliv údržbou či kontrolou. Technologické nároky k jeho výrobě bývají natolik složité, že jeho rozebráním by došlo k narušení některých částí (usazení hlavice na izolátoru, těsnicí systém) a pro zpětné uvedení do provozu by bylo nutné znovu procházet částí výrobního řetězce, případně provádět funkční zkoušky. Obecně se doporučuje nerozebírat vypínač po co nejdelší dobu, v praxi zhruba po dobu 10 let.

2.3 Poznatky z provozní praxe

Studium spolehlivosti jak obecně vysokonapěťového zařízení, tak konkrétně vypínačů se vzhledem k jeho ceně a tržnímu prostředí stává citlivým tématem a nástrojem jednotlivých výrobců. Vysoká investice do kvalitního a bezúdržbového zařízení se setkává s minimálními výdaji pro jejich revize a údržbu; naproti tomu je možná malá investice do zařízení s čtenějšími poruchami s tím vědomím, že v průběhu jeho života budou vyšší náklady na opravy a revize. Získané poznatky by měly být využity pro normalizační procesy v mezinárodním měřítku, a tím být zpětnou vazbou pro konstruování a zkoušení vypínačů.

Pro získání vypovídajících výsledků je potřeba velké množství studovaných vypínačů se všemi dalšími údaji jako je jeho stáří, princip zhášení oblouku či množství provedených operací. Jedná se tedy o rozsáhlé databáze. Spolehlivosti vypínačů se věnovala CIGRE SC 13.06 ve svých třech mezinárodních průzkumech v uplynulých desetiletích. Právě z těchto průzkumů, jejichž výsledky jsou zpracovány v [3], [4] a [5], pocházejí data na následujících stránkách.

2.3.1 Výsledky mezinárodních průzkumů

Díky svému jedinečnému složení a významu CIGRE, byly provedeny tři rozsáhlé průzkumy na provozní spolehlivost vypínačů a její důsledky na zkoušení a navrhování.

První průzkum zahrnoval zhruba 78.000 circuit-breaker years na všech napěťových hladinách, z provozu 22 zemí během let 1974 až 1977. Tento průzkum iniciovala Electricité de France (EDF) jako důsledek svých testů, díky nimž byl vyvinut nátlak na úpravu norm. Tento výzkum ukázal, že nejčastější poruchou (MF) je *"nespíná na povel"*, případně *"nerozepíná na povel"*, čili možná vylepšení by měla směřovat k mechanickému subsystému, tedy k pohonné jednotce. Zároveň ukázal, že 95% vypínačů během 25 let provozu nenastřádalo více než 2000 sepnutí. Tento fakt vedl v roce 1982 k navýšení minimálního počtu spínacích cyklů daného normami z 1000 na 2000.

Druhý průzkum byl prováděn v letech 1988 až 1991 jako odpověď na otázku, zda po prvním provedeném průzkumu došlo ke zlepšení spolehlivosti jak výrobní, tak provozní. Tento průzkum byl zaměřen jen na vypínače s SF6 s minimálním napětím 63 kV.

Podíl MF a mf vzhledem k počtu poruch pro jednotlivé napěťové hladiny je uveden v následující tabulce:

Napětí (kV)	I. průzkum	II. průzkum
63-99	0,0041/0,0165	0,0028/0,0223
100-199	0,0163/0,0417	0,0068/0,0475
200-299	0,0258/0,0639	0,0081/0,0697
300-499	0,0455/0,1635	0,0121/0,0776
500+	0,1045/0,0493	0,0197/0,0837

Tab. 2.1: Procentní podíl MF/mf v jednotlivých průzkumech

Uvedená tabulka potvrzuje některé předpokládané skutečnosti. Je vidět silný pokles obecné poruchovosti na všech napěťových hladinách, způsobený více než desetiletým časovým rozdílem mezi jednotlivými průzkumy. Zároveň je vhodné si všimnout vzájemných poměrů MF a mf na stejných napěťových hladinách. Vidíme, že mnohonásobně častější a běžnější jsou mf. Pro bližší a konkrétnější pohled na spolehlivost vypínače jako celku je však nutné věnovat se jednotlivým původům daných selhání. Tyto původy byly zkoumány v druhém průzkumu a přinesly výsledky dané v tabulce 2.2.

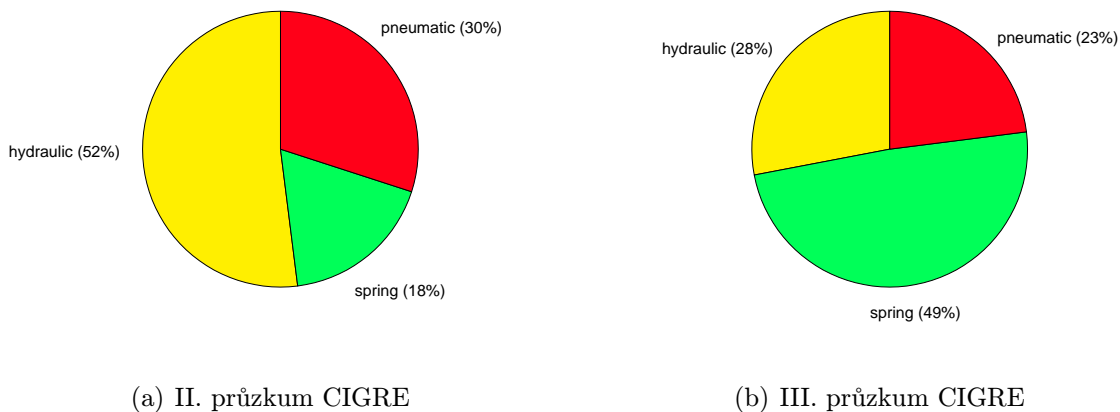
Percentil	Původ poruchy (MF)
24,6	nespíná na povel
8,3	nerozepíná na povel
1,0	spíná bez povelu
7,0	rozepíná bez povelu
1,7	nevytvoří proud po sepnutí
3,0	nepřeruší proud
1,5	nepřenáší proud
3,2	průraz na zem
1,5	průraz mezi póly
5,1	přeskok mezi rozepnutými póly
28,5	uzamčeno v sepnuté/rozepnuté poloze
14,6	jiný původ

Tab. 2.2: Procentní podíl jednotlivých původů poruch v rámci II. průzkumu CIGRE

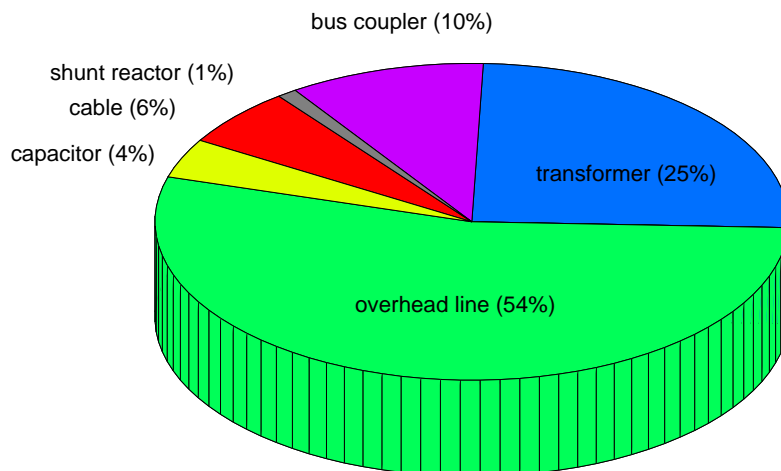
Z této tabulky je patrný vliv mechanického pod systému vypínače na jeho celkovou spolehlivost – zhruba polovina všech vyskytujících se MF má původ v pohonné jednotce

a komunikaci s ochranami. Další třetina pak má původ v elektrické části, čili MF jsou způsobeny např. špatně navrženou zhasací tryskou, či příliš velkým vypínaným proudům. Dalším aspektem tohoto rozboru jsou následky těchto rozdílných původů MF, které je nutné řešit individuálně a těžko se hledají spojitosti pro zobecnění získaných poznatků. Díky velikostem vypínaných proudů je možné říci to, že poruchou v pohonné jednotce dojde k ohrožení blízkých zařízení "nevelkými proudy", dokud nedojde k nápravě situace vnějšími prvky. Na druhou stranu poruchy v elektrické části vypínače bývají často destruktivní a tím dochází k významnějším hospodářským ztrátám a většímu nebezpečí pro lidský život.

Třetí průzkum probíhal v letech 2004 až 2007 a zahrnoval celkem přes 122.000 circuit-breaker years a byl zaměřen na rozčlenění MF/mf dle napěťových hladin, dle umístění, dle určení vypínače, případně i dle způsobu jeho údržby. Tento průzkum ještě nebyl uzavřen (finální výsledky se zpracovávají), ale i přesto jsou dostupné některé dílčí závěry uvedené na obrázcích 2.5 a 2.6.



Obr. 2.5: Typ pohonu vypínačů v jednotlivých průzkumech



Obr. 2.6: Účel zkoumaných vypínačů v ES

Uvedené obrázky naznačují některá důležitá fakta:

- Nadpoloviční většina vypínačů v provozu je určena pro chránění venkovních vedení. To znamená, že na napěťových hladinách vvn při možných selháních vypínače jsou ohroženy přenosové linky. Tím pádem jsou v ohrožení i transformovny vvn/vn včetně distribučních sítí vyšších napětí.
- I přes to, že pohony jsou dnes v polovině případů pružinové (oproti dřívější pětině případů), pohonná jednotka stále zůstává velmi poruchovým prvkem vypínače.
- Z časového vývoje je zřejmé, že v dřívějších dobách byl většinovým důvodem poruch právě pohon. V současné době se však dostávají do popředí poruchy způsobené elektrotechnickými prvky – selháním vypínače, průrazy ve zhášecí komoře či ochranami a pomocnými obvody.

V následující tabulce je uveden původ MF/mf s procentuálním zastoupením v rámci druhého průzkumu.

Počet případů	Poruchy 475	Závady 3375
Mechanický v pohonné jednotce	203 (44%)	1275 (39%)
Mechanický v jiné části vypínače	48 (10%)	319 (10%)
Elektrický (hl. obvod)	64 (14%)	29 (1%)
Elektrický (ovládací a pomocné)	113 (25%)	330 (10%)
Těsnost plynového hospodářství	33 (7%)	1280 (40%)
Celkem	461 (100%)	3233 (100%)
Neurčený původ	14	125

Tab. 2.3: Původ všech událostí s procentuálním zastoupením

Tato tabulka výborně popisuje původce poruch a závad. Vidíme, že velkým problémem je pohon, který způsobuje mezi třetinou a polovinou všech MF/mf. Z jejich vzájemného poměru lze usoudit to, že závada se rozvine v poruchu zhruba v jednom ze šesti případů. Zároveň je vhodné si všimnout poměrů MF/mf pro *Těsnost plynového hospodářství* - vidíme, že právě to způsobuje 40% všech mf, ale jenom každá 39. se rozvine v MF (což odpovídá zhruba 7% ze všech MF).

2.3.2 Důležité závěry z provedených průzkumů

Z provedených výzkumů tedy vyplývají tyto důležité skutečnosti:

Pohon

Nehledě na typ pohonu vypínače, právě pohon patří mezi nejporuchovější části vypínače. To je způsobeno tím, že při každé spínací operaci je pohon zatěžován stejně – nezáleží na velikosti vypínaného proudu, pohonná jednotka je při každém spínání mechanicky zatěžována konstantně. Na tento fakt je nutné brát zřetel např. při provozu generátorových vypínačů u přečerpávacích vodních elektráren, kde ke spínání dochází i několikrát denně.

Elektrický systém

Se zvyšujícími se nároky na přenos a rozvod elektrické energie a na vypínání v limitních oblastech vypínacích charakteristik, se postupem času do popředí poruchovosti dostala i elektrický podsystém vypínačů. A právě díky těmto limitním oblastem jsou následky výskytu poruchy způsobené nevypnutím mnohem větší a nebezpečnější.

Plynové hospodářství

Plynové hospodářství vypínačů s plynem SF₆ je technologicky náročné a tedy i znatelně ovlivňující spolehlivost. Naštěstí jen 7% MF bylo způsobeno právě únikem plynu. Trend by neměl být rostoucí.

3

Zkratové proudy a jejich vypínání

Vodivým spojením dvou či více částí obvodu s odlišným elektrickým potenciálem, které za normálních provozních podmínek nemají být spojené, dochází k tzv. *zkratu*. Zkrat je poruchový stav obvodu, při kterém se díky nízkaimpedančnímu spojení znatelně zvýší proud ve zkratovém obvodu, poklesne napětí v místě zkratu a zkratový proud neprochází přes spotřebič. Nejvíce je ohroženo místo zkratu, kterým protéká od vytvoření zkratu až do jeho vypnutí vypínačem či pojistkami zkratový proud (mnohonásobek provozního proudu). V elektrizační soustavě díky mnoha používaným napěťovým hladinám, různým provedením, uspořádáním a provozním podmínkám mají i zkratové proudy různé velikosti, vlastnosti i účinky. Dle počtu spojených fází dělíme zkraty na:

- trojpólový izolovaný/zemní zkrat,
- dvojpólový izolovaný/zemní zkrat,
- jednopólový zemní zkrat (jen v sítích s účinně uzemněným uzlem).

Troj-pólový zkrat je souměrná porucha, dvoufázový izolovaný i zemní zkrat a jednofázový zkrat jsou nesouměrné poruchy. Jejich procentuální četnost na venkovním vedení je uvedena v následující tabulce .

Přibližná četnost výskytu jednotlivých zkratů v [%]				
Síť	3f izolovaný	2f izolovaný	2f zemní	1f
vn	10	8	17	65 ¹
110 kV	0,5	5	3,5	91
220 kV	1	1	5	93

Tab. 3.1: Přibližná četnost výskytu zkratů [7]

Výsledky uvedené v tabulce 3.1 odpovídají provozním zkušenostem a praktickým předpokladům. Na všech napěťových hladinách je zcela převládající jednofázový zkrat, naopak

¹V sítích vn s uzlem nepřímo uzemněným nebo izolovaným se nejedná o zkrat, ale o jednofázové zemní spojení

velmi ojedinělý je zkrat všech tří fází. Pokud by v tabulce byly uvedeny i nižší napěťové hladiny se zahrnutím kabelových sítí, pak by převládající poruchou byl třífázový zkrat – vzniklým elektrickým obloukem při poruše by se poškodila izolace kabelu a porucha by tak snadno vyústila ve zkrat všech tří fází. Analytické řešení těchto poruch využívá metody souměrných složek, přičemž třífázový zkrat je souměrný, využije se tak pouze sousledná složka impedance. Dvoufázový pak využívá souslednou a zpětnou složku a jednofázový zemní zkrat je nutné řešit všemi třemi složkami – souslednou, zpětnou i netočivou.

Poruchy mohou vzniknout nejen na venkovním či kabelovém vedení, ale i v rámci elektrických stanic. Z celkového počtu poruch připadá na venkovní vedení zhruba 66% případů, na kabelová vedení 21,5% a na elektrické stanice zhruba 12,5%. Blíže je tento poměr uveden včetně jednotlivých příčin v následující tabulce 3.2.

Přibližné počty poruch v [%]				
Příčiny poruch	Objekt poruchy			
	Venk. vedení	Kab. vedení	El. stanice	Celkem
Atmosférické přepětí	38	1	7	46
Vnější zásahy	16	11	1	28
Závady materiálu	5	5	1	11
Chyby obsluhy	4	0,5	2,5	7
Ostatní	3	4	1	8
Celkem	66	21,5	12,5	100

Tab. 3.2: Přibližné počty poruch dle příčiny [7]

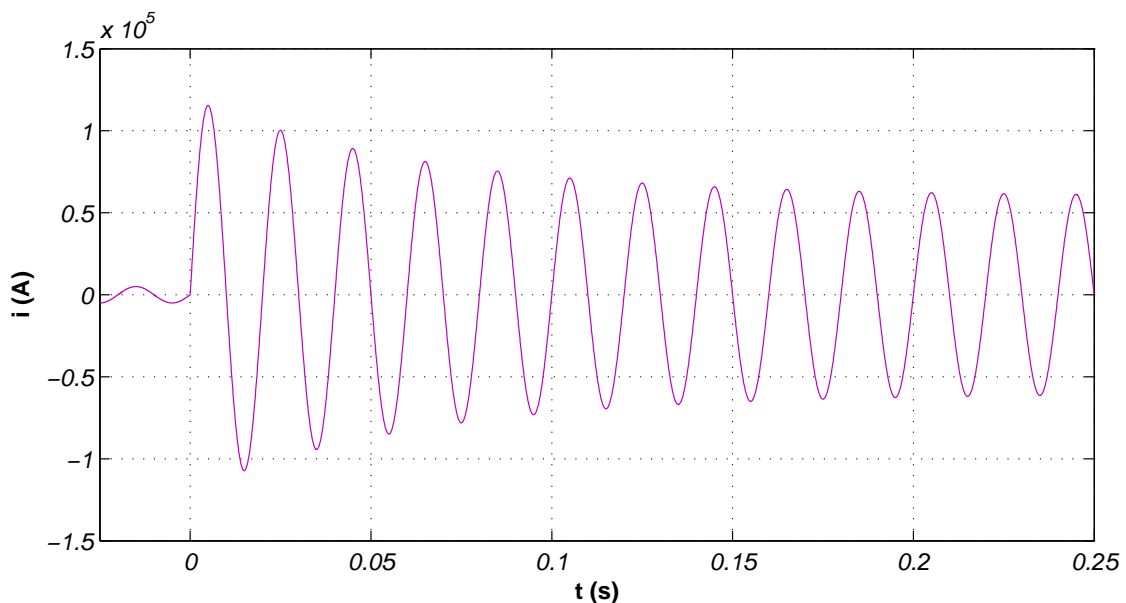
Mezi vnější zásahy je možné zařadit zásahy nepověřených osob, zvíře, vegetace apod. Mezi ostatní příčiny např. vadnou montáž, provozní přepětí či jiné nahodilé jevy.

Dále je možné zkraty rozlišovat na *galvanický* a *obloukový*. Při galvanickém zkratu je impedance spojení téměř nulová (např. dotyk dvou fázových vodičů) a zkratový proud tak není příliš omezený a dosahuje vysokých hodnot. Galvanických zkratů se využívá např. při zkoušení zkratové odolnosti rozvaděčů, kdy se tenkým drátkem přemostí přípojnice a následnými tepelnými účinky dojde k přetavení tohoto drátku a sledují se mechanické účinky prvních několika amplitud na přípojnice a konstrukci rozvaděče. K obloukovému zkratu dochází tehdy, pokud mezi jednotlivými částmi vznikne elektrický oblouk. Ten svým odporem brání průchodu proudu, takže jeho velikost bude nižší než při galvanickém zkratu. Ale svými vlastnostmi jako je velká proudová hustota a vysoká teplota plazmatu způsobuje odpovídající tepelné ztráty a tedy velké nebezpečí na okolní zařízení z hlediska tepelných účinků (např. obloukový zkrat uvnitř transformátoru vede k jeho zničení). Oba dva z uvedených typů jsou velmi nebezpečné svými mechanickými i tepelnými účinky a je proto nezbytně nutné jejich včasné a spolehlivé vypnutí.

3.1 Symetrický zkratový proud

Pokud dojde ke vzniku zkratu v momentě, kdy se okamžitá hodnota protékajícího proudu rovná nule, nevyvine se žádná stejnosměrná složka a obálka průběhu zkratového proudu je pak symetrická podle časové osy (osy x). Tento fakt vychází ze zákona zachování energie, protože síť jakožto pasivní prvek induktivního charakteru má schopnost akumulovat v sobě energii magnetického pole, kterou nelze měnit skokově. V okamžiku vzniku zkratu dojde ke změně konfigurace obvodu a začne protékat zkratový proud, jehož prvních několik amplitud je vyšších než jsou amplitudy ustáleného zkratového proudu. To je způsobeno rázovou a přechodnou složkou, která vzniká v synchronních strojích (v alternátorech pracujících do sítě či synchronních kompenzátorech). Tyto složky mají exponenciální charakter a po několika periodách odezní a zkratový proud se ustálí.

Typický průběh symetrického zkratového proudu je uveden na obr. 3.1.



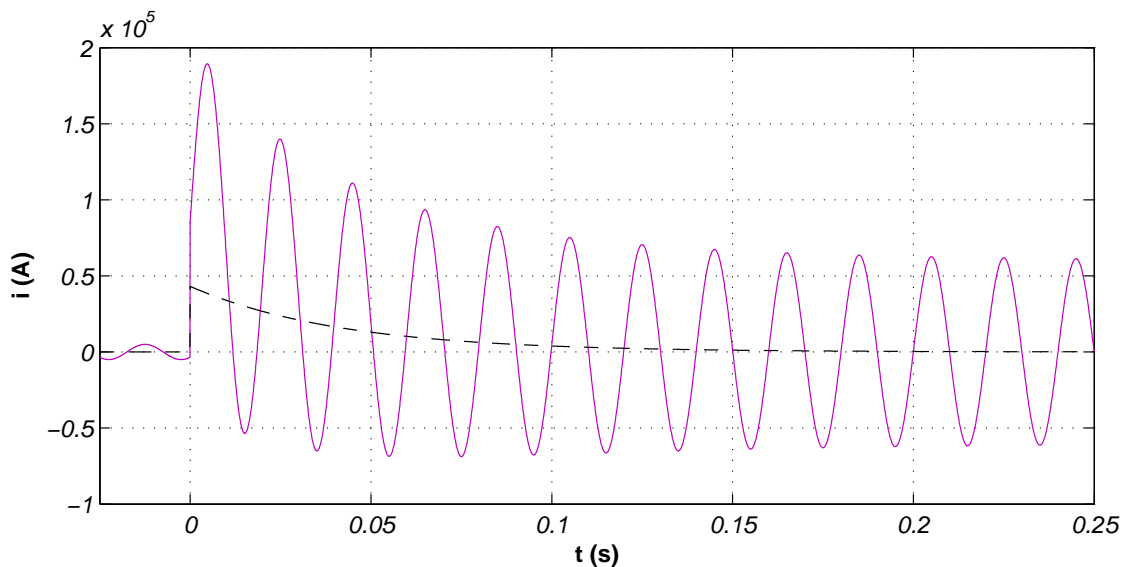
Obr. 3.1: Ilustrační příklad symetrického zkr. proudu

Pro symetrické průběhy platí, že proud prochází nulou vždy po 10 ms . To je pro vypínání velice přínosný fakt, protože jde o nejkratší možnou dobu mezi dvěma průchody nulou. Tím je zajištěno, že v průběhu plné vypínací schopnosti vypínače máme garantované minimálně 2 průchody proudu nulou, během nichž vypínač obvykle vypíná. Blíže bude tato problematika popsána v dalších kapitolách.

3.2 Asymetrický zkratový proud

Protože pravděpodobnost výskytu symetrického zkratového proudu je nízká, naprostá většina vzniklých zkratů jsou asymetrické zkraty (cca 1 symetrický zkrat na 9 asymetrických). Vznikem zkratu v okamžiku s nenulovou hodnotou proudu se vyvine stejnosměrná

složka a dojde k vychýlení průběhu proudu nad časovou osu. Toto vychýlení je tím větší, čím je vyšší okamžitá hodnota proudu (v absolutní hodnotě). K největší asymetrii tedy dochází v okamžiku proudového maxima.² Výsledný průběh zkr. proudu je pak superpozicí symetrického zkratu a stejnosměrné složky. Stejnosměrná složka pak exponenciálně klesá ze své počáteční hodnoty s časovou konstantou τ , která je dána induktivní reaktancí X_L a činného odporu R zkratového obvodu. Časová konstanta τ je ve standardech IEEE a IEC normována na 133 ms . To znamená, že stejnosměrná složka se obvykle utlumí po cca 160 až 200 ms, což odpovídá osmi až deseti periodám. Typický průběh asymetrického zkr. proudu s vyznačenou stejnosměrnou složkou je uveden na obrázku 3.2. Vidíme, že okamžitá hodnota při vzniku zkratu byla nenulová a měla fázi δ od své nulové hodnoty.



Obr. 3.2: Ilustrační příklad asymetrického zkr. proudu

Z porovnání obrázků 3.1 a 3.2 je patrné, že proud při asymetrickém zkratu dosahuje značně vyšších hodnot a tím i větší tepelné a mechanické účinky (kvadratická závislost síly \mathbf{F} , resp. tepelných ztrát \mathbf{Q} na procházejícím proudu). Asymetrický proud je tedy nebezpečný pro přípojnicové systémy a vinutí transformátorů či elektrických strojů.

Dalším kritériem, ve kterém je asymetrický zkrat problematičtější, je sledování veličiny I^2t . To je veličina, která se sleduje v řídicích a ochranných systémech při vzniklých zkratech, či jiných poruchách. V podstatě jde o integrál z protékajícího proudu a značí nám množství energie, která při zkratu projde obvodem. Lze vidět, že vychýlením průběhu nad osu dojde i ke značnému nárůstu veličiny I^2t . Tuto veličinu navýší i delší doba trvání mezi jednotlivými průchody nulou.

²V některé literatuře se jako nejhorší okamžik vzniku asymetrického zkratu považuje okamžik napětové nuly. To je způsobeno zanedbáním činného odporu sítě a uvažuje se jen indukčnost (fáz. posuv 90° mezi napětím a proudem).

3.3 Vypínací proces

Pro studium vypínací schopnosti vypínačů je potřebné znát důkladně průběh spínacího procesu – stavy hořícího oblouku, provozní vlastnosti zhašecího média a vliv obvodu na spínací oblouk. Hořící elektrický oblouk ve střídavém obvodu (a v určité míře tedy i vypínací proces) lze rozčlenit do tří základních intervalů, ze kterých plynou podmínky pro navrhování a zkoušení vypínačů:

- silnoprůdový interval
- interakční interval
- dielektrický interval

Vypínací proces je děj, který je zahájen oddálením kontaktů vypínače a je ukončen v okamžiku, kdy kontakty mají maximální zdvih, spínací oblouk byl uhašen a je zajištěna dostatečná elektrická pevnost ve vypínací dráze tak, aby nedocházelo k průrazům vlivem spínacích přepětí. Během tohoto pochodu nastane každý interval minimálně jednou. [10]

3.3.1 Silnoprůdový interval

Silnoprůdový interval je časový úsek, kdy obloukem protékají velké proudy. V oblasti velkých proudů má oblouk malé napětí, které je zanedbatelné vůči napětí zdroje, tedy i odpor oblouku je malý a zanedbatelný vůči impedanci obvodu (takové předpoklady však neplatí při vypínání malých induktivních a kapacitních proudů, kdy obloukové napětí deformuje křivku proudu). V silnoprůdovém intervalu se tedy neuvažuje vzájemné působení mezi obloukem a vypínaným obvodem.

V okolí maxima proudu se proud mění jen velmi málo, protože $\left(\frac{di}{dt}\right)_{I_{max}} = 0$. Budeme-li uvažovat, že změna od maximální hodnoty proudu je do 10%, čili $I/I_{max} \leq 0,9$, pak této změně odpovídá časový interval:

$$\Delta t = 2 \cdot \frac{1}{\omega} \arcsin(0,9) = 2 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot 50} \arcsin(0,9) = 2,78 \cdot 10^{-3} [s] \quad (3.1)$$

Výsledek $\Delta t = 2,78 \cdot 10^{-3} s$ odpovídá 27,8% doby půlperrody proudu. Vzhledem k tomu, že časová konstanta oblouku je zhruba stokrát menší než uvažovaná oblast Δt , lze oblouk hořící v silnoprůdovém intervalu považovat za stacionární.

V silnoprůdovém intervalu má hořící oblouk velký průměr a rozhodující je zde maximální hodnota proudu I_{max} . Pro tuto hodnotu je nutné stanovit kritéria, aby se vlivem nadměrného zahlcení trysky nenarušil vypínací proces. Při nadměrném zahlcení trysky je omezeno proudění plynu i v okolí nuly proudu. Tomuto případu se říká *termické selhání vypínače*. Dalším kritériem nutným pro návrh zhašecí komory je termické působení oblouku. To nesmí způsobit tepelné poškození, jako například tavení konstrukčních částí zhašedla. [1]

3.3.2 Interakční interval

Interakční interval je charakterizován interakcí mezi proudem a obloukovým napětím, tj. mezi spínacím obloukem a obvodem, a je klíčovým pro úspěšné či neúspěšné vypnutí. Interakční interval je těžištěm problematiky teoretických i experimentálních výzkumů vypínací schopnosti a zkušebních metod a provedené výzkumy spínacího oblouku se zaměřují právě na interakční interval. Sledujeme jej v oblasti proudové nuly, kdy probíhá výrazná změna proudu i napětí. Projeví se tím tedy časová konstanta oblouku a je tedy nutné na hořící oblouk nahlížet jako na dynamický. Interakční interval lze při zkoumání rozdělit na dva dílčí časové úseky:

- a) interval *výrazné změny obloukového napětí* před průchodem proudu nulou,
- b) interval *zbytkového proudu* po průchodu proudu nulou.

Počáteční podmínky oblouku hořícího v interakčním intervalu jsou dány vlastnostmi hoření v silnoproudém intervalu. Z toho důvodu není možné striktně oddělit tyto dva intervaly a jejich změna probíhá plynule.

3.3.3 Dielektrický interval

Počátek dielektrického intervalu lze přesně určit jako okamžik, kdy došlo k přerušení proudu v obvodu. Během něj dochází k rozpadu zbytkového obloukového sloupce (rekombinace nosičů náboje, ochlazování proudícím plynem). Při selhání v dielektrickém intervalu, kdy vlivem přeskočků nastane opětné zapálení oblouku, lze sledovat skok v průběhu $\frac{di}{dt}$ 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 či 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. Dojde-li k průrazu až po maximální hodnotě zotaveného napětí, je to většinou způsobeno nevhodným rozložením elektrického pole, což je možné ovlivnit správným uspořádáním kontaktů.

3.4 Zotavené napětí

Zotaveným napětím rozumíme napětí, které se objeví na svorkách vypínače po přerušení proudu. Uhasnutí oblouku iniciuje přechodový děj, během něhož se úbytek napětí na

hořícím oblouku vyrovnává na napětí zdroje. Zotavené napětí je součtem obnoveného napětí, které je dáno průběhem napětí zdroje a přechodnou složkou, o jejímž průběhu rozhoduje charakter sítě a poruchy.

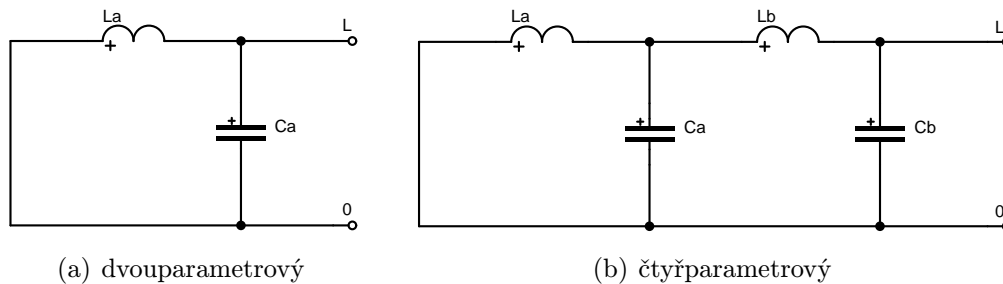
Při svorkovém zkratu (tj. v blízkosti svorek vypínače v rámci rozvodny) je impedance zkratového obvodu minimální a zkratové proudy tak nabývají nejvyšších hodnot. Pro stanovení přechodné složky zotaveného napětí se prvky soustavy nahrazují indukčnostmi a kapacitami, ze kterých se sestavuje náhradní obvod. Pro náhradní jednodukmitočtový obvod definovaný indukčností L_A a kapacitou C_A platí:

$$u_{zn} = u_{ob} \cdot (1 - e^{\alpha t \omega_0 t}) \quad (3.2)$$

V rovnici 3.2 je člen α součinitel tlumení přechodné složky a ω_0 je vlastní úhlová frekvence, pro kterou platí:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_A C_A}} \quad [rad \cdot s^{-1}] \quad (3.3)$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad [Hz] \quad (3.4)$$



Obr. 3.3: Náhradní obvody pro stanovení průběhu zotaveného napětí

Pro vypínání je obvykle důležitá zejména počáteční strmost zotaveného napětí. Její hodnotu přibližně udává přímkou spojující počátek souřadných os a první amplitudu zotaveného napětí, která bývá díky velkému překmitu i maximální hodnotou průběhu. V reálných situacích je obtížné stanovit strmost u_{zn} předem, proto bylo provedeno spoustu experimentů pro získání závislosti mezi vypínaným proudem I_v a počáteční strmostí. Experimenty ukázaly, že tyto dvě veličiny jsou nepřímo úměrné, což ilustruje tab. 3.3.

Vyp. proud	$30\% \cdot I_v$	$60\% \cdot I_v$	$100\% \cdot I_v$
Strmost	$5kV/\mu s$	$3kV/\mu s$	$2kV/\mu s$

Tab. 3.3: Hodnoty počáteční strmosti u_{zn} pro různé hodnoty proudu $I_v = 40 kA$ vypínače SF6

Při blízkém zkratu, který vzniká ve vzdálenosti od několika set metrů do cca $3 km$ od svorek vypínače, se na připojeném vedení objeví vlnové pochody. To se projeví tím, že na

svorce připojené k vedení vznikne pilový průběh s frekvencí v řádech stovek kHz . Tyto pilové kmity se utlumí ještě před první amplitudou, ale prvotní strmý nárůst zotaveného napětí bývá často příčinou nevypnutí blízkých zkratů. Závislost mezi strmostí zotaveného napětí a vypínaným proudem je pro blízké zkraty uvedena v rov. 3.5.

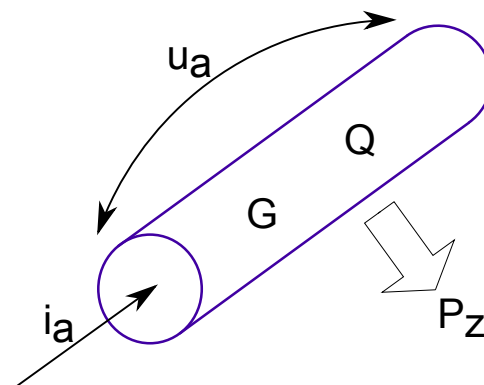
$$\frac{du_{zn}}{dt} = -2\pi f Z_0 \cdot I_v \cdot \sqrt{2} \approx 0,2 \cdot I_v \quad [kV/\mu s; kA] \quad (3.5)$$

Přesné stanovení zotaveného napětí je obtížné. Většina v současné době známých závislostí mezi vypínaným proudem a zotaveným napětím pro různé disciplíny byla získána z mnoha provedených zkoušek a experimentů. Pro vypínaný proud $40 kA$ je interakční interval rozhodující do jmenovitého napětí $145 kV$. V tomto rozsahu se u vypínačů s plynem SF6 neobjevovaly elektrické průrazy, zatímco u tlakovzdušných vypínačů průrazy omezovaly jejich použití do napětí $100 kV$. Po zvýšení napětí vypínačů SF6 na $245 kV$ (či $200 kV$ v případě dvou komor vypínače pro $420 kV$) se však jako rozhodující projevil dielektrický interval. Zotavené napětí dosahovalo maximálních hodnot okolo $400 kV$, přičemž zkušební napětí ve vypnutém stavu je $500 kV$ a rázové zkušební napětí $1100 kV$. Tyto hodnoty několikanásobně převyšují dřívější parametry komor tlakovzdušných vypínačů. [11]

3.5 Elektrický spínací oblouk

3.5.1 Stacionární oblouk

Elektrický oblouk je specifický druh výbojové činnosti, která nepotřebuje žádný vnější zdroj energie ionizačního činidla k ionizaci prostředí a překleneje celou vzdálenost mezi elektrodami. Jedná se tedy o samostatný a úplný výboj. Oblouk je vysokoteplotní plazma, které se vyznačuje vysokou proudovou hustotou (až $10^5 A/cm^2$), nízkou hodnotou katodového úbytku (desítky V) a vysokou teplotou elektrod a ionizovaného plynu.



Obr. 3.4: Náčrt oblouku s vyznačenými klíčovými parametry

Stacionární oblouk se vyznačuje tím, že klíčové parametry oblouku uvedené na obr. 3.4 se v závislosti na čase téměř nemění a ztráty odváděné do okolí jsou rovné příkonu oblouku.

Elektrický stav je obecně popsán voltamperovou charakteristikou, jež pro stacionární oblouk definuje rovnice Ayrtonové:

$$U_a = \alpha + \beta \cdot l_a + \frac{\gamma + \delta l_a}{I} \quad (3.6)$$

V uvedené rovnici jsou $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ konstanty závislé na délce oblouku, prostředí, druhu a tlaku plynu, l_a je délka oblouku. Vhodnou úpravou lze rovnici Ayrtonové přepsat do tvaru:

$$U_a \cdot I^\sigma = konst. \quad (3.7)$$

Tato rovnice je matematickým vyjádřením hyperboly, tedy obloukové napětí je nepřímo úměrné protékajícímu proudu.

Stacionární oblouk byl historicky využíván v 19. století v obloukových lampách, dnes je jeho aplikace soustřeďována na využití v obloukových pecích či plazmatronech.

3.5.2 Dynamický oblouk

Vlivem vysokých teplot obloukového sloupce je hořící oblouk charakterizován vlastním tepelným obsahem, který díky tepelné setrvačnosti nelze měnit skokově. Mírou této tepelné setrvačnosti je časová konstanta oblouku τ , která charakterizuje rychlost odezvy sledované veličiny (obloukového napětí) na skokovou změnu vstupní veličiny (proudu). Klíčovým vztahem pro popis oblouku je energetická bilance. Ta říká, že příkon dodávaný do oblouku se rozděluje na hrazení ztrát oblouku P_z a změnu tepelného obsahu $\frac{dQ}{dt}$.

$$u_a \cdot i_a = \frac{dQ}{dt} + P_z \quad (3.8)$$

Z této rovnice lze určit časovou konstantu jako:

$$\tau = \frac{Q}{P_z} \quad (3.9)$$

Veličiny Q i P_z jsou však nelineárně závislé na teplotě, proto časová konstanta závisí na počátečních podmínkách a takto definovanou ji lze uvažovat jen v určitém rozmezí proudů. Nicméně definici časové konstanty dle rovnice 3.9 lze pro modelování oblouku ve spínacích přístrojích uvažovat jako obecně platnou. Širšímu rozsahu případů je pak nutné uvažovat celé spektrum časových konstant.

Význam časové konstanty roste při určování průběhu vodivosti oblouku. Pro časovou změnu vodivosti oblouku platí:

$$\frac{dG(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot [G_s - G(t)] \quad (3.10)$$

$$\frac{dG(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} \cdot G(t) = \frac{1}{\tau} \cdot G_s \quad (3.11)$$

Rovnice 3.11 je výchozí diferenciální rovnicí pro popis skokových změn.

Chování dynamického oblouku je tedy závislé na mnoha faktorech. Pro návrh zařízení je nutné prozkoumat možné stavy oblouku během spínacích operací, z čehož vzešel požadavek na podrobnější matematický popis oblouku. Tak vznikaly jednotlivé modely, které se lišily rozdílným náhledem na obloukový sloupec a předpokládaly rozdílná zjednodušení. Nejnázornější a nejpropracovanější jsou v tomto ohledu modely dle Cassieho a Mayra, z nichž vychází spousta dalších, zejména v současné době hojně využívané kybernetické modely. Mezi klíčové parametry pro modelování oblouku patří jeho teplota, vodivost a její změna, obloukové napětí, tepelný obsah, a rozměry (délka a průměr obloukového sloupce).

3.5.3 Cassieho teorie oblouku

Výchozí rovnicí pro modelování spínacího oblouku dle Cassieho je energetická bilance oblouku dle rovnice 3.8. Zjednodušujícími předpoklady Cassieho teorie jsou:

1. teplota oblouku T , obloukové napětí U_a , měrná vodivost γ a tepelná energie v jednotce objemu q jsou konstantní,
2. měrná vodivost plazmatu je úměrná teplu v něm akumulovanému,
3. 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 zejména odvod ztrát prouděním z celého povrchu, čili veškerý příkon do oblouku 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:

$$G = \pi \cdot r^2 \cdot \gamma \quad (3.12)$$

$$Q = \pi \cdot r^2 \cdot q \quad (3.13)$$

$$P_z = \pi \cdot r^2 \cdot p_z \quad (3.14)$$

Pak tedy:

$$\frac{Q}{q} = \frac{G}{\gamma} = konst. \Rightarrow Q = \frac{q}{\gamma} \cdot G \quad (3.15)$$

Zderivováním rovnice 3.15 získáme:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{q}{\gamma} \cdot \frac{dG}{dt} \quad (3.16)$$

Dosazením této rovnice do energetické bilance a postupnými úpravami získáme výslednou rovnici Cassieho teorie (rov. 3.17).

$$\frac{1}{G(t)} \frac{dG(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \cdot \left[\left(\frac{u_a(t)}{U_{as}} \right)^2 - 1 \right] \quad (3.17)$$

Ve výsledné rovnici je obloukové napětí U_{as} v ustáleném stavu, které ve spínacích přístrojích běžně nabývá hodnot z intervalu $0,3kV$ až $5kV$ (v závislosti na napěťové hladině). Mění-li se stacionární stav oblouku, pak se průběh G a u_a mění podle výše uvedené diferenciální rovnice. Nový ustálený stav je charakterizován stejným úbytkem napětí na oblouku U_{as} , změní se poloměr oblouku r a s ním i nově ustálené hodnoty G , Q a P_z . Cassieho model je nejlépe využitelný pro oblast velkých proudů, kdy je obloukové napětí téměř konstantní.

3.5.4 Mayrova teorie oblouku

Obdobně jako Cassieho teorie, i Mayrova teorie vychází z energetické bilance oblouku, rozdíl je však ve zjednodušujících předpokladech. V souladu se skutečností je předpokládán exponenciální růst vodivosti v závislosti na akumulovaném teple. Dále se předpokládá, že průměr oblouku $2r$ a ztráty konvekcí P_z jsou konstantní. Vycházíme z uvažované exponenciální závislosti vodivosti na akumulovaném teple, kterou logaritmujeme a poté zderivujeme:

$$G = k \cdot e^{(Q/Q_0)} \quad (3.18)$$

$$\ln G = \ln k + \ln \frac{Q}{Q_0} \quad (3.19)$$

$$\frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} = \frac{1}{Q_0} \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (3.20)$$

$$\frac{dQ}{dt} = Q_0 \frac{1}{G} \cdot \frac{dG}{dt} \quad (3.21)$$

Dosazením výsledné rovnice do energetické bilance oblouku za dQ/dt získáme:

$$\frac{dG}{dt} + \frac{P_z}{Q_0} \cdot G = \frac{u_a \cdot i}{Q_0} \cdot G \quad (3.22)$$

Úpravou rovnice 3.22 získáme charakteristickou rovnici Mayrovy teorie:

$$\frac{1}{G(t)} \frac{dG(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u_a(t) \cdot i(t)}{P_z} - 1 \right) \quad (3.23)$$

Mayrův model uvažuje konstantní odvod ztrát a je vhodný pro oblast malých proudů, což je rozhodující v okolí proudové nuly. To je rozhodující pro vypnutí vypínače, proto je vhodné při odvozování vypínací schopnosti klást větší důraz právě na Mayrův model. [11]

V současné době pokročilé výpočetní techniky je možné modelovat oblouk kombinací Cassieho a Mayrova modelu, které jsou zapojeny v sérii. Dále lze různě navolit vstupní parametry (vodivost, průběh napětí, průběh proudění chladícího média) a tím získat přesnější výsledky o chování spínacího oblouku.

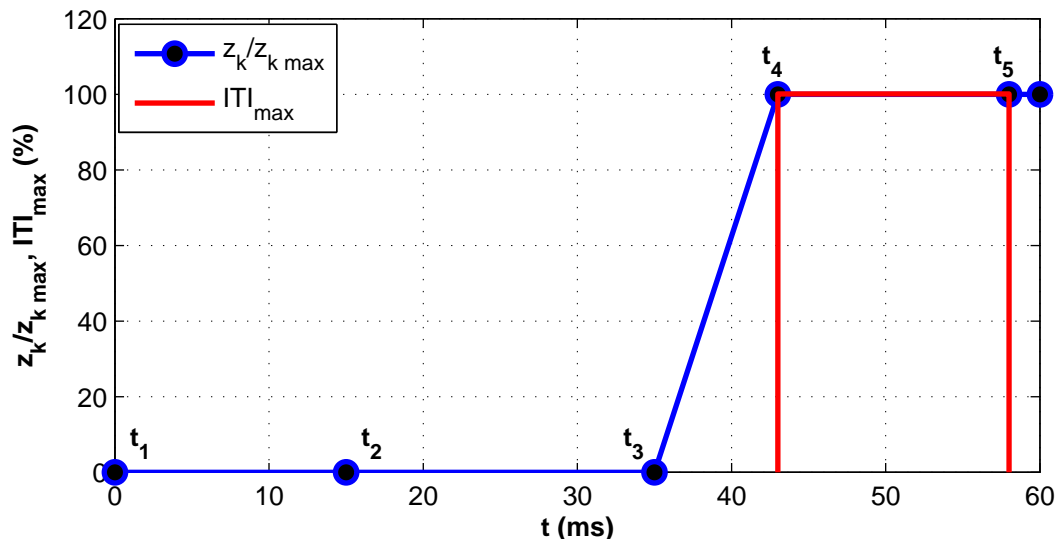
3.6 Vypínací interval

Vypínací interval (angl. *interrupting time interval*, odtud zkratka **ITI**) určuje časový úsek trvání plné vypínací schopnosti. V průběhu ITI vypínače musí přerušit vypínaný proud. Co možná nejrychlejší růst vypínací schopnosti a její dlouhá doba trvání jsou klíčové pro návrh zhášecí komory a pohonu vypínače, čímž definuje šířku ITI. Na dobu vypínacího okna má dále vliv mechanická funkce vypínače a to rozdílně v závislosti na typu zkratu z hlediska vypínací disciplíny. Vypínací interval je omezen dobou pohybu kontaktů a prouděním plynu ve zhášecí komoře. [10]

Okamžik vybavení ochrany (impuls na elektromagnet)	$t_1 = 0 \text{ ms}$
Uvolnění pohonu (doba vybavení elektromagnetu)	$t_2 = t_1 + 15 \text{ ms} = 15 \text{ ms}$
Začátek pohybu kontaktů	$t_3 = t_2 + 20 \text{ ms} = 35 \text{ ms}$
Rozpojení kontaktů a hoření oblouku	$t_4 = t_3 + 8 \text{ ms} = 43 \text{ ms}$
Ukončení proudění plynu	$t_5 = t_4 + 15 \text{ ms} = 58 \text{ ms}$

Tab. 3.4: Časová posloupnost vypínacího procesu vypínače SF6

V tabulce 3.4 je uvedena experimentálně zjištěná časová posloupnost vypínacího pochodu vypínače SF6 s hydraulickým pohonem. Na obrázku 3.5 je pak táž posloupnost graficky znázorněná spolu s vyznačeným vypínacím oknem ITI.



Obr. 3.5: Časová posloupnost vypínacího procesu vypínače SF6

4

Generátorový zkrat

Generátor a vyvedení výkonu tvoří pojící část mezi elektrárnou a elektrickou sítí, do které dodává elektrický výkon. Nutnost spolehlivé funkce celého vyvedení výkonu je tím vyšší, čím je vyšší výkon daného bloku. Při zkratu na svorkách alternátoru přispívá zkratovým proudem zejména právě alternátor. Tepelné účinky tohoto proudu pak namáhají vinutí stroje, což může v některých případech tepelně degradovat izolaci. Zároveň dojde k mechanickému působení – jednak vlivem silových účinků vyvolaných elektrodynamickými silami, jednak změnou elektrického momentu stroje dojde k přenášení momentových rázů na soustrojí. [9]

4.1 Zavedení Parkovy transformace

Řešení generátorového zkratu je obecně složitý postup, jelikož se jedná o elektro-magneticko-mechanický přechodný děj. Zatímco elektromagnetické děje jsou velice rychlé a v podstatě nezávislé na vnějších podmínkách, mechanické děje jsou mnohem delší a je nutné zde předpokládat určité podmínky. Pro řešení rychlého přechodného děje jako je např. zkrat je možné uvažovat konstantní rychlost stroje. V dostatečně krátkém časovém intervalu se tak mechanické poměry změní jen málo. Pro řešení delších přech. dějů je však nutné zahrnout i mechanické změny a jejich vliv na stabilitu provozu.

Při odvozování průběhů proudů, momentů a napětí alternátorů využíváme tzv. *Parkovy transformace*. Ta spočívá v tom, že veličiny spojené se statorem převádíme do jedné vztažné rotující soustavy spojené s rotorem v osách \mathbf{d} (podélná), \mathbf{q} (příčná) a $\mathbf{0}$ (nulová). Zpětnou transformací pak lze získat požadované průběhy ve statorových fázích A , B , C . Předpoklady použití Parkovy transformace jsou:

- sinusové rozložení magnetického pole ve vzduchové mezeře,
- plná symetrie statoru,
- symetrie rotoru podle os d a q .

Výhoda Parkovy transformace spočívá v tom, že po její aplikaci bude mít rotor vůči statoru konstantní¹ polohu definovanou zátěžným úhlem θ . Harmonicky proměnné veličiny (indukčnosti, reaktance, magnetické toky) tak přejdou do konstantní podoby. Zároveň tím dojde k eliminaci nelinearity diferenciálních vztahů mezi magnetickými toky, proudy a indukovanými napětími.

4.2 Třífázový zkrat statorového vinutí

4.2.1 Průběh přechodného děje

Protože předpokládáme lineární prostředí, lze při řešení zkratu postupovat metodou superpozice předporuchového stavu a přímých injektovaných změn daných poruchou. Řeší se tak dva navzájem nezávislé obvody – lineární aktivní bezporuchový obvod protékaný proudem $i_{[u]}$ a lineární pasivní obvod s poruchovým proudem i_h . Vlastní poruchový proud má část ustálenou i_{hu} a volnou (přechodnou) i_V . Matematicky vyjádřeno dle rovnice 4.1.

$$i(t) = i_{[u]}(t) + i_{hu}(t) + i_V(t) \quad (4.1)$$

V rotoru bude situace obdobná, ale při zanedbání regulace buzení z rovnice vypadáva ustálená hodnota poruchového proudu. Rotorový proud tak bude mít jen ustálenou složku $i_{f[u]}$ a volnou poruchovou složku i_{fV} .

$$i_f(t) = i_{f[u]}(t) + i_{fV}(t) \quad (4.2)$$

Volné proudy statoru mají střídavou a stejnosměrnou složku. Stejnosměrná složka i_a odeznívá s časovou konstantou statoru T_a a vyvolá pulsující pole v rotoru (vlivem synchronních otáček). Toto pole je možné rozložit dle Leblancova teorému na dvě protisměrná točivá pole s poloviční amplitudou. Tím pádem v rotoru přibude volná střídavá složka $i_{f\omega}$, ve statoru pak přibude volná složka proudu s dvojnásobnou frekvencí $i_{2\omega}$.

Obdobně v budícím vinutí stejnosměrná složka i_{fa} odeznívá s časovou konstantou rotoru. Magnetické pole vytvořené tímto proudem je unášeno rotorem synchronními otáčkami a tím indukuje ve statoru napětí, které způsobí vznik volné střídavé složky ve statoru i_ω . Magnetické pole vytvořené touto střídavou složkou je točivé a vzhledem k rotoru je v klidu. Tato volná střídavá složka odeznívá s časovou konstantou rotoru.

Ve výsledku tak v přechodném ději budou vystupovat tyto složky:

Statorové:

- $i_{[u]}$ - proud předcházejícího ustáleného stavu s frekvencí f ,
- i_{hu} - ustálený proud vlastního poruchového stavu s frekvencí f ,
- i_a - volná stejnosměrná složka zkr. proudu s časovou konstantou statoru,

¹Platí pro ustálený stav

- $i_{2\omega}$ - volná střídavá složka zkr. proudu s dvojnásobnou frekvencí, s časovou konstantou statoru,
- i_{ω} - volná střídavá složka zkr. proudu s frekvencí f a časovou konstantou rotoru.

Rotorové:

- $i_{f[u]}$ - stejnosměrný budící proud ustáleného provozního stavu,
- i_{fa} - volná stejnosměrná složka budícího proudu s časovou konstantou rotoru,
- $i_{f\omega}$ - volná střídavá složka budícího proudu s frekvencí f a časovou konstantou statoru,
- $i_{D\omega}$ - volná střídavá složka proudu v tlumiči s frekvencí f a časovou konstantou statoru,
- i_{Da} - volná stejnosměrná složka s proudem tlumiče s časovou konstantou rotoru.

Posloupnost příčiny a důsledku ss. složky statorového proudu je znázorněn následující relací:

$$i_a \longrightarrow i_{f\omega} \longrightarrow i_{2\omega}$$

V případě ss. složky rotorového proudu bude tato relace jednodušší, přičemž celý řetězec se ale u stroje s tlumičem objeví dvakrát – jednou díky stejnosměrné složce v budícím vinutí a podruhé díky stejnosměrné složce v tlumiči:

$$i_{fa} \longrightarrow i_{\omega(1)}$$

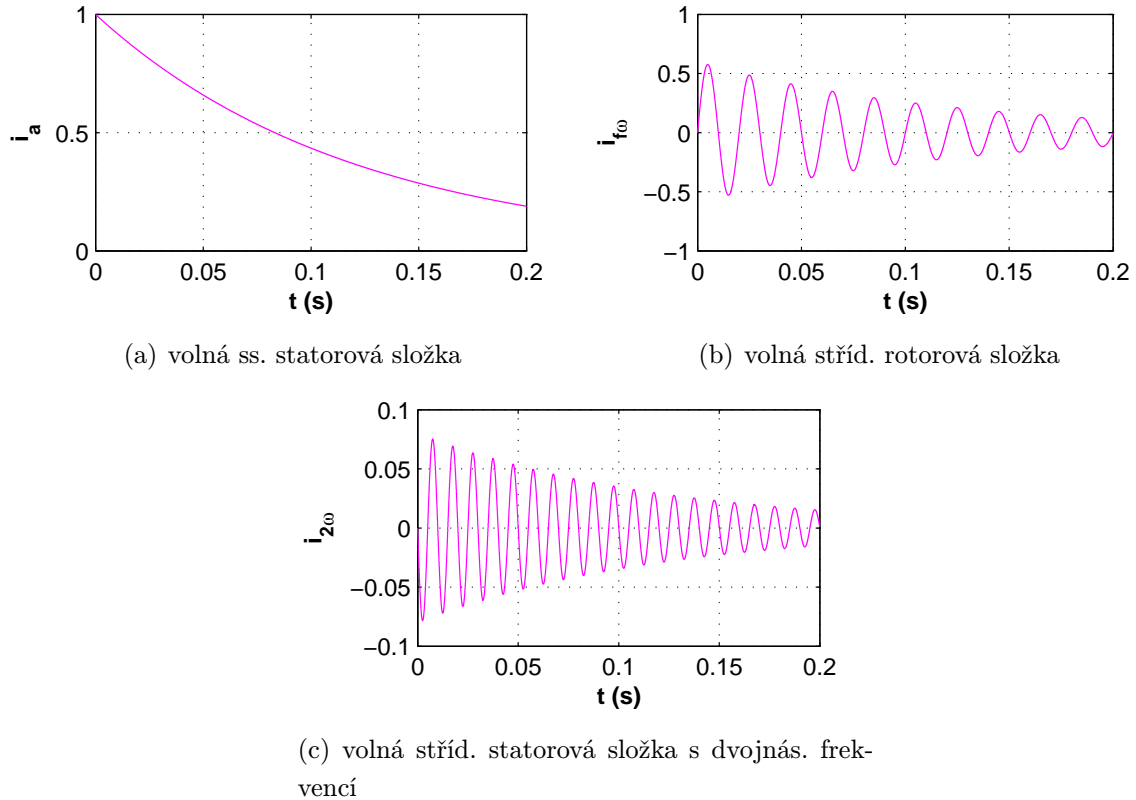
$$i_{Da} \longrightarrow i_{\omega(2)}$$

Na níže uvedených obrázcích 4.1 a 4.2 jsou naznačeny průběhy jednotlivých složek dle příčiny (ss. složky statoru či rotoru).

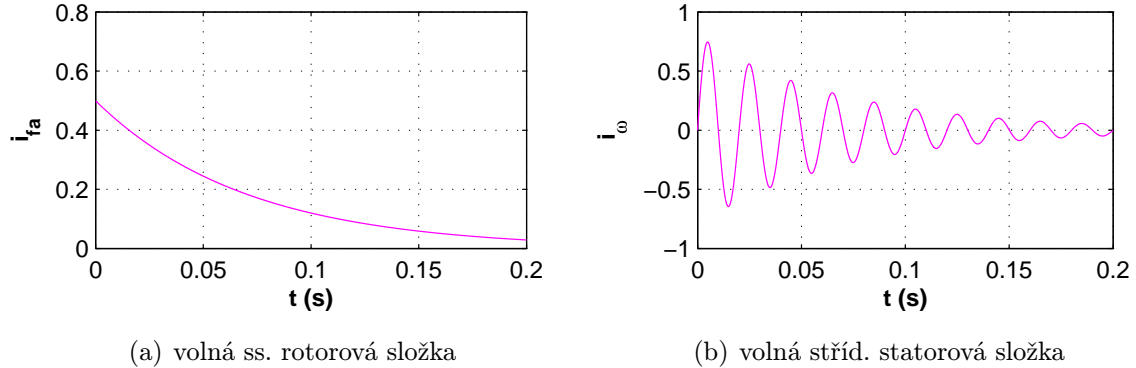
Protože volná střídavá složka s dvojnásobnou frekvencí $i_{2\omega}$ bývá obvykle velice malá, bude v následujícím textu zanedbávána. Zkratový proud pak lze členit pouze na dvě složky – střídavou složku o základní frekvenci a stejnosměrnou složku i_a . Další dekompozicí jednotlivých složek do os d a q pak lze postupovat v odvození průběhu zkratového proudu. Při zanedbání činného odporu statorového vinutí lze určit ustálený proud předchozího stavu, který je rozhodující pro první okamžik přechodného děje. Rozepsáno do jednotlivých os bude mít tento stav následující podobu:

$$u_q = e + x_d i_d \quad (4.3)$$

$$u_d = -x_q i_q \quad (4.4)$$



Obr. 4.1: Přechodné složky způsobené stejnosměrnou složkou ve statoru



Obr. 4.2: Přechodné složky způsobené stejnosměrnou složkou v rotoru

Touto metodikou lze odvodit vztahy pro všechny proudy, které se podílejí na výsledném zkratovém proudu, rozdíly budou ve velikostech indukovaných či elektromotorických napětí a zúčastněných reaktancích. V jednotlivých osách pak bude mít zkratový proud následující podobu (princip indexace je shodný s předchozím značením):

$$i_d(t) = i_{d[u]} + i_{dhu} + i_{da}(t) + i_{d\omega}(t) = i_{du} + i_{da}e^{-\frac{t}{T'_d}} + i_{d\omega m}e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (4.5)$$

$$i_q(t) = i_{q[u]} + i_{qhu} + i_{q\omega}(t) = -\frac{u_{d[0]}}{x_q} + \frac{u_{d[0]}}{x_q} + i_{q\omega m}e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (4.6)$$

Výsledný průběh zkratového proudu ve statorovém vinutí získáme zpětnou transformací proudů i_d a i_q .

4.2.2 Průběh zkratového proudu ve statorovém vinutí

Postupnými úpravami a zpětnou transformací rovnic 4.5 a 4.6 se získá matematický předpis pro průběh zkratového proudu ve statorovém vinutí. Uvedený vztah platí pro fázi A stroje s tlumičem:

$$\begin{aligned}
 i_A = & -E \cdot \sqrt{2} \cdot \left[\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \cos(\omega \cdot t + \alpha_0) + \\
 & + \frac{E \cdot \sqrt{2}}{2} \left(\frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x''_q} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos(\alpha_0) + \\
 & + \frac{E \cdot \sqrt{2}}{2} \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x''_q} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos(2\omega t + \alpha_0)
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

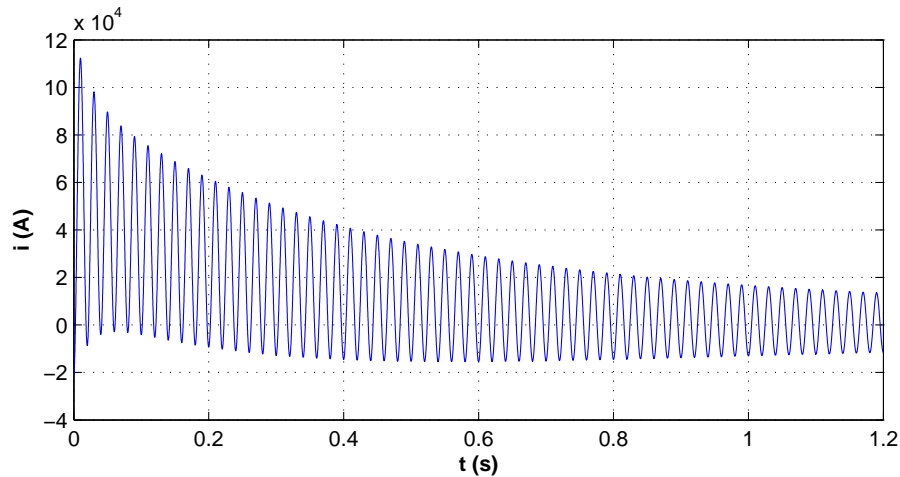
Jde o poměrně složitý výraz, který však plně respektuje přechodné děje v alternátoru během zkratu. V první části se vyskytuje součet ustálené x_d , přechodné x'_d a rázové x''_d složky. Jsou to periodické složky o jmenovité frekvenci, přičemž přechodná i rázová složka jsou exponenciálně tlumeny dle svých časových konstant. Druhý řádek uvedené rovnice vyjadřuje stejnosměrnou složku. Ta ze své počáteční hodnoty exponenciálně klesá dle časové konstanty statoru a její velikost ovlivňuje rázová reaktance v obou osách a parametr α_0 . Třetí řádek znázorňuje složku proudu s dvojnásobnou frekvencí. Tato složka je tlumena časovou konstantou statoru.

K podrobnějšímu rozklíčování jednotlivých složek dojde až v následující kapitole, ale už na tomto místě je vhodné zdůraznit vliv parametru α_0 . Ten udává úhel mezi podélnou osou stroje a osou fáze statorového vinutí v okamžiku vzniku zkratu. Uvedená rovnice 4.7 tak platí i pro fáze B a C, přičemž jediná změna bude právě v parametru α_0 , který se bude lišit o $\pm 120^\circ$.

Obecný průběh zkratového proudu v jedné fázi je uveden na obr. 4.3.

4.2.3 Popis jednotlivých složek

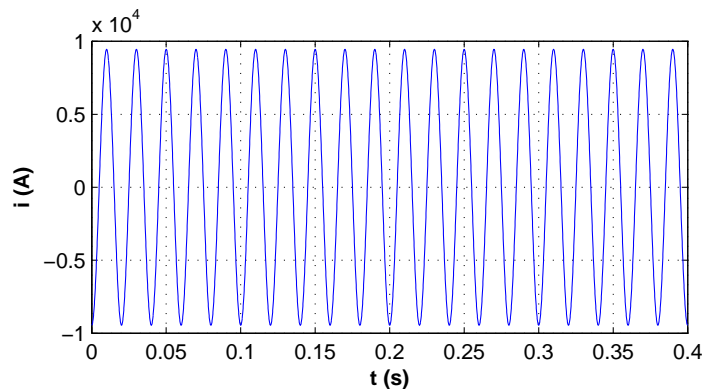
Pro zhodnocení výsledného průběhu je nutné diskutovat zúčastněné složky, jejichž výskyt je závislý na zdánlivě nesouvisejících parametrech. Přesnost matematického určení jednotlivých parametrů je v případě synchronního stroje velmi citlivá na přijatých předpokladech a postupu řešení při jejich odvození. To zdatelně ovlivňuje hodnoty jednotlivých parametrů a průběh výsledného proudu.



Obr. 4.3: Průběh zkr. proudu ve statorovém vinutí - odeznění přech. děje

Ustálená

Po odeznění přechodného děje přispívá generátor do zkratu ustáleným zkratovým proudem. Je periodický se jmenovitou frekvencí a není tlumen. Jeho velikost je dána synchronní reaktancí v podélné ose x_d . Ta nabývá velikostí $1,2 - 2,4 p.u.$ pro turboalternátory a $0,8 - 1,4 p.u.$ pro hydroalternátory. Ustálený zkratový proud turboalternátorů tak bude typově nižší než v případě hydroalternátorů. Ustálený zkratový proud lze určit na základě výsledků ze zkoušek nakrátko.



Obr. 4.4: Ustálená složka zkratového proudu

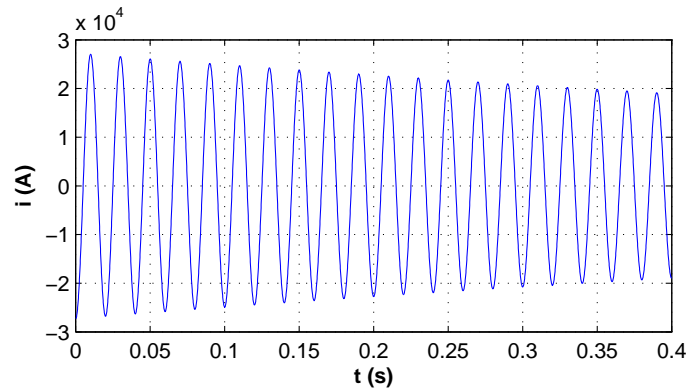
Přechodná

Přechodná složka vzniká jako důsledek volné stejnosměrné složky proudu v budícím vinutí. Je charakterizována přechodnou (tranzitní) reaktancí v podélné ose x'_d . Pro turboalternátory tato reaktance nabývá hodnot $0,15 - 0,3 p.u.$ a pro hydroalternátory $0,2 - 0,4 p.u.$ Typově tedy mají hydroalternátory vyšší přechodnou reaktanci. Porovnáním s x_d je zřejmé, že přechodná složka zkratového proudu bude několikrát větší než ustálená složka.

Přechodná složka je periodická se jmenovitou frekvencí a její průběh je exponenciálně

tlumen dle přechodné časové konstanty T'_d , jejíž velikost se pohybuje od několika setin sekundy až po jednotku sekundy. To je poměrně dlouhá doba v přechodném ději, což je způsobeno tím, že reaktance budícího vinutí je znatelně vyšší oproti rezistenci.

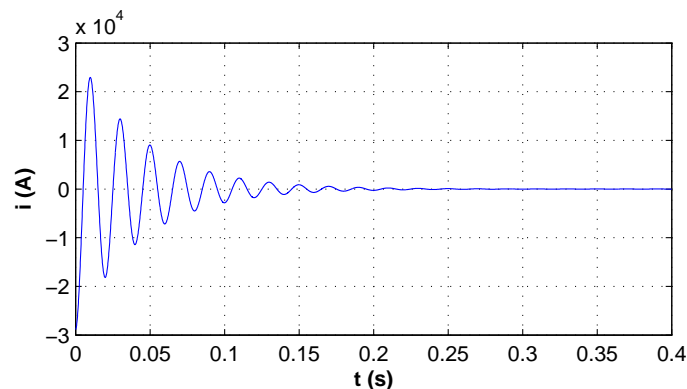
$$T'_d \sim x_f / \omega r_f \quad (4.8)$$



Obr. 4.5: Přechodná složka zkratového proudu

Rázová

Rázová složka vzniká jako důsledek volné stejnosměrné složky proudu v tlumícím vinutí. Je charakterizována rázovou (subtranzitní) reaktancí v podélné ose x''_d . Její velikost se pohybuje v rozmezí $0,1 - 0,3 p.u.$, přičemž u hydroalternátorů bývá vyšší než u turboalternátorů. Opět lze porovnáním s x_d a x'_d usoudit, že rázová složka bude nabývat nejvyšších hodnot.



Obr. 4.6: Rázová složka zkratového proudu

Rázová složka je periodická se jmenovitou frekvencí a její průběh je exponenciálně tlumen dle rázové časové konstanty T''_d . Její velikost je v řádu jednotek setin sekundy. Rázová složka je tedy největší, ale po několika periodách je již zcela utlumena. Induktivní reaktance tlumiče je totiž srovnatelná s jeho rezistencí. Z těchto důvodů je tedy pro hodnocení prvních okamžiků po vzniku zkratu rozhodující právě rázová složka a s ní spojený tlumič.

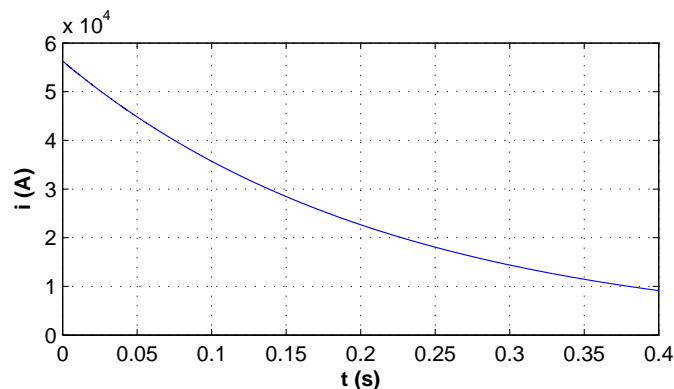
Stejnoseměrná

Stejnoseměrná složka zajišťuje kontinuitu proudu v okamžiku vzniku zkratu. Během její existence dochází k vyrovnávání elektromagnetické energie v akumulovaných indukčnostech mezi stavem předchozím a novým poruchovým. Stejnoseměrná složka vzniká ve statorovém vinutí a exponenciálně klesá s časovou konstantou statoru T_a . Při odvozování T_a se vychází z náhradních schémat stroje v jednotlivých osách a využívá se některých zanedbávajících předpokladů, např. odpor budícího či tlumícího vinutí se předpokládá nulový.

$$T_a = \frac{2x_d''x_q''}{\omega r (x_d'' + x_q'')} \quad (4.9)$$

Vidíme, že průběh stejnoseměrné složky ovlivňuje zejména tlumič, a to jak v podélné, tak v příčné ose. Časová konstanta T_a je nepřímo úměrná odporu statorového vinutí. To znamená, že k útlumu dochází vlivem rezistence statorového vinutí. Čím vyšší bude, tím rychlejší bude útlum stejnoseměrné složky.

Velikost stejnoseměrné složky je však závislá zejména na okamžiku vzniku zkratu, což ve výše uvedeném vzorci 4.7 značí hodnotu $\cos(\alpha_0)$. Je-li v okamžiku vzniku zkratu podélná osa rotoru souhlasně s osou vinutí statorové fáze, pak spřažený magnetický tok je maximální, indukované napětí má nulovou hodnotu a proud nabývá svého maxima. Stejnoseměrná složka se tak vyvine maximální, protože $\cos(\alpha_0) = \cos(0) = 1$. Díky této vzájemné závislosti a natočení fází o $\pm 120^\circ$ bude součet stejnoseměrných složek ve všech třech fázích roven nule.



Obr. 4.7: Stejnoseměrná složka zkratového proudu

S dvojnásobnou frekvencí

Průběh generátorového zkratu ovlivňuje i složka proudu s dvojnásobnou frekvencí jako důsledek volné střídavé složky v rotoru. Její amplituda je dána rozdílem rázové impedance v podélné a příčné ose x_d'' a x_q'' . Jejich hodnoty jsou si však velmi blízké (v mnoha případech se rovnají), takže složka s dvojnásobnou frekvencí bude blízká nule. Běžně tedy lze složku s dvojnásobnou frekvencí zanedbat.

5

Požadavky na vypínací schopnost

5.1 Požadovaná vypínací schopnost v interakčním intervalu

Jak již bylo zmíněno, interakční interval je rozhodující pro úspěšné vypnutí vypínače. Ve střídavých obvodech dochází k vypnutí v nulové hodnotě proudu. V tomto okamžiku je vypínač namáhán časově proměnným proudem a napětím a toto namáhání je tím větší, čím rychlejší jsou změny daných veličin. Požadovaná vypínací schopnost je tedy dána vztahem:

$$Q_i = \frac{di}{dt} \cdot \frac{du}{dt} \quad (5.1)$$

Uvedený vztah do určité míry spojuje interakční a dielektrický interval. Zatímco nulovou hodnotu proudu sledujeme v interakčním intervalu, zotavené napětí je již otázkou dielektrického intervalu a jeho průběh je závislý na vypínaném obvodu a vypínací disciplíně.¹

Nejprve je nutné, aby bylo v okolí proudové nuly zajištěno dostatečné chlazení, čímž se zvýší odpor oblouku a objeví se napěťová zhášecí špička. Chlazením je zajištěno snižování vodivosti hořícího oblouku, který je v okolí proudové nuly nestabilní. V druhém dílčím intervalu zbytkového proudu prochází obloukem ještě v řádech desítek μs zbytkový proud. To je způsobeno zbytkovou vodivostí a tepelnou setrvačností oblouku. Z energetické bilance (chladičí výkon musí být vyšší než elektrický příkon do oblouku) vyplývá, že snahou návrhářů je omezit tento proud jak velikostně, tak časově.

V interakčním intervalu je průměr oblouku o poznání menší než je průměr zhášecí trysky a dochází tak k intenzivnímu chlazení zhášecím médiem, které proudí v axiálním směru. Charakter proudění není obloukem nijak ovlivněn. [12]

¹Pro orientační výpočty se často udává hodnota $2kV/\mu s$

5.2 Vypínací schopnost tlakovzdušných vypínačů

Tlakovzdušné vypínače jsou se svým principem zhášení spínacího oblouku jedny nejstarších. Prouděním natlakovaného vzduchu (tlaky 2 – 6 MPa) dochází k intenzivnímu chlazení oblouku a tím i k jeho zhasnutí. Hodnoty elektrických a mechanických veličin při spínání jsou závislé na provedení zhášecí komory a principu zhášení. Zhášecí komory se vyvíjeli ve třech směrech. Prvním byl vypínač *s otevřenými zhášedly*, kde k hašení docházelo tlakovým vzduchem, ale ve volném otevřeném prostoru. Oblouk tak musel být uhašen již během proudění vzduchu. Některé vypínače s otevřenými zhášedly byly vybaveny zařízením pro otáčivý pohyb izolátoru nesoucího roubík a izolátoru nesoucího zhášecí trysku; tím bylo docíleno vyšší rychlosti při vypínání. Zhášení zde probíhalo ve dvou fázích. Nejprve byl od sebe oddalován pevný a pohyblivý kontakt, jehož dutinou začal proudit tlakový vzduch díky zmenšování prostoru pod pracovním pístem tohoto kontaktu. V této fázi je tlak proudícího vzduchu ovlivněn zahlcením trysky elektrickým obloukem. Tím je regulována vypínací schopnost v první fázi vypínání. Po ukončení pohybu kontaktů je zcela otevřena cesta natlakovanému vzduchu, jehož muselo být dostatek pro úspěšné vypnutí.

Dalším typem byly vypínače *s uzavřenou zhášecí komorou s porcelánovým pláštěm*. Jejich zhášecím komorám se říkalo *impulsové*, protože po úspěšném vypnutí se kontakty vracely zpět do zapnutého stavu. Z toho důvodu musely být vybaveny rozpojovačem, což byla část vypínače, která zajišťovala trvale rozepnutý stav. Tlakovým vzduchem se nejprve naplnil prostor zhášedla, který potom zapůsobil na pohyblivý kontakt a tím došlo k pohybu kontaktů. Po rozpojení kontaktů začal vzduch proudit mezi tryskami a přírubami zhášedla, odkud vzduch proudil do volného ovzduší. Po ukončení proudění došlo k odvzdušnění prostoru a pružiny vracely kontakty zpět do výchozí zapnuté polohy. Třetím typem byly vypínače *se zhášecí komorou s kovovým pláštěm*, které byly nazývány *průchodkové*. Ty byly velice podobné předchozímu typu, ale zhášecí komory byly pod trvalým přetlakem, díky čemuž byla zajištěna vyšší vypínací schopnost už od začátku vypínání.

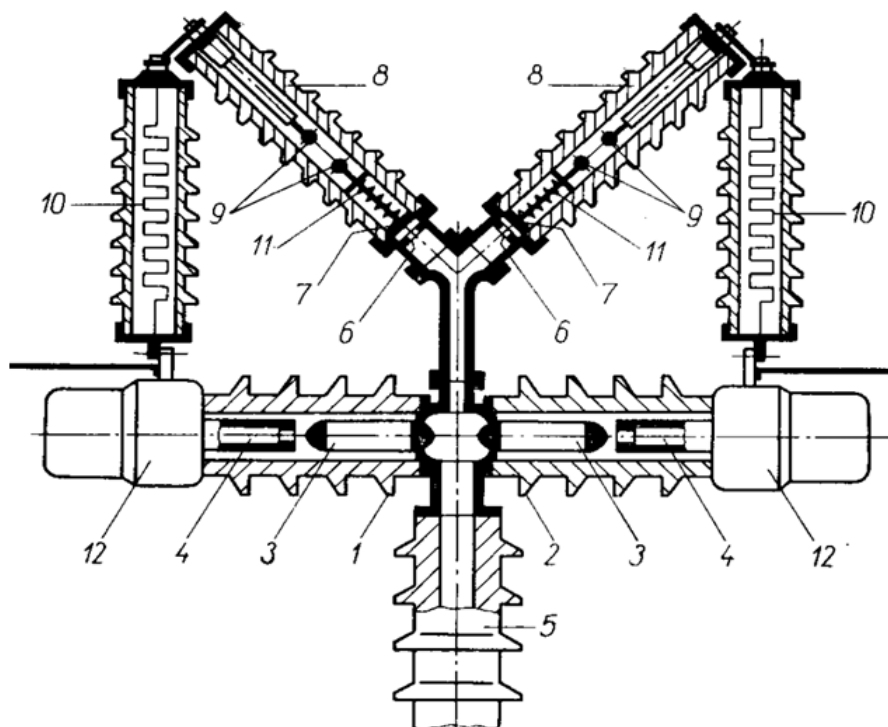
Vypínací schopnost tlakovzdušných vypínačů je sice rozdílná u jednotlivých provedení, ale je silně vázána na proudící vzduch. Obecně je jejich vypínací schopnost popsitelná vztahem 5.2, kde v udává rychlost proudění vzduchu, ρ udává hustotu a h značí entalpii:

$$Q_{TLV} \approx v \cdot \rho \cdot h \quad (5.2)$$

Po ukončení proudění tedy vypínací schopnost okamžitě klesá k nulové hodnotě. Pro úspěšné vypnutí musí být při vypínání zajištěna tato podmínka:

$$Q_{TLV} > Q_i \quad (5.3)$$

Tlakovzdušné vypínače byly první, u kterých se objevil problém s vypínáním asymetrických proudů. Jak již bylo řečeno, vychýlením průběhu nad časovou osu dojde k prodloužení intervalů mezi průchody proudu nulou. Tlakovzdušné vypínače však historicky měly



Obr. 5.1: Řez tlakovzdušným vypínačem, dvě zhášedla v sérii, 3 - pevné kontakty, 4 - pohyblivé kontakty, 5 - nosný izolátor, 10 - zhášecí odpor. [Převzato z [14]]

konstrukčně daný vypínací interval na zhruba 10 ms, během nichž bylo zaručeno proudění plynu a vypínač obvykle vypnul. Díky větším asymetriím pak bylo kritické vypínání v mezních oblastech vypínacího intervalu, kdy byl zásobník tlakového vzduchu vyčerpán a vypínač nevypnul (oblouk zhasl až po zapůsobení nadřazeného spínacího prvku). Zajištění déletrvající vypínací schopnosti vedlo k udržení proudění vzduchu po delší dobu. S tím je však spojena i velikost tlakové nádoby, nároky na kompresory a údržbu, což podstatně zvýšilo cenu a rozměry výsledného zařízení.

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> + rychlost proudícího plynu tzn. rychlé reakční časy + dostupnost zhášecího media (vzduchu) + možnost sériového řazení komor + vysoká vypínací schopnost v interakčním intervalu 	<ul style="list-style-type: none"> - technologie tlakového vzduchu (kompresory, těsnost, cena) - omezené trvání vyp. schopnosti - vysoké strmosti zotaveného napětí - akustické jevy při vypínání

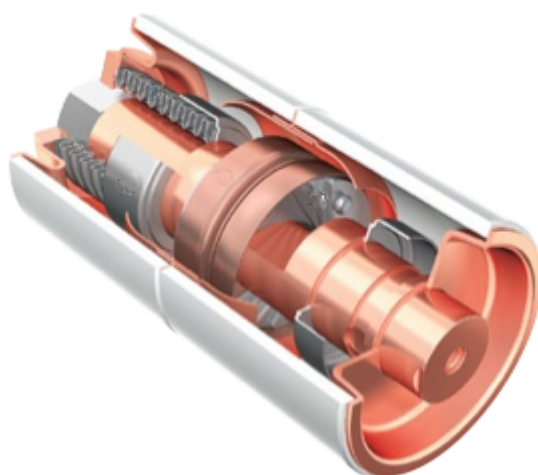
Tab. 5.1: Výhody a nevýhody tlakovzdušných vypínačů

V současné době již vývoj tlakovzdušných vypínačů neprobíhá a jejich nasazení v elektrizační soustavě je téměř nulové. Tlakovzdušné vypínače se však stále místy používají v trakci na starších lokomotivách.

5.3 Vypínací schopnost vakuových vypínačů

Vakuové vypínače jsou nejmodernější vysokonapěťové vypínače. Vyrábějí se pro venkovní i vnitřní použití pro distribuční sítě vn, kde nahradili ostatní a zastaralejší typy vypínačů (převážně tlakovzdušné a maloolejové).

Princip vakuového vypínače je poměrně jednoduchý. Vakuum o tlaku 10^{-4} až 10^{-6} Pa obsahuje jen velmi malé množství vodivých částí a chová se tak jako izolant. Prostředí se tak téměř neionizuje. Při oddalování kontaktů vzniká mezi kontakty mrak kovových par odpařených ze styčných ploch kontaktů, který se ionizuje a vzniká tak oblouk. Při proudech do cca 10 kA hoří oblouk v tzv. *difúzním módu*, což je oblouk s probíhajícími elementárními procesy na katodě. Nad 10 kA z difúzního módu přechází oblouk do vysokotlakého (oblouk nezabírá plochu celých elektrod, ale je zúžen do paprsku), jehož zhášení je ve vakuu obtížnější. Proto je důležité, aby při vypínání nepřešel oblouk do vysokotlakého režimu. Prakticky se to provádí působením magnetického pole. Kontakty mají zářezy, díky nimž oblouk rotuje a tím se ochlazuje. Po dostatečném oddálení kontaktů a rotaci oblouk uhasíná a kovové páry pak kondenzují na povrchu kontaktů a vodivém stínítku. Po uhašení oblouku se opět obnoví elektrická pevnost vakua.



Obr. 5.2: Vakuové zhášedlo z mědi a chromu používané ve vypínačích řady W-VACi, vyvinuté firmou Eaton. [Převzato z [16]]

Nespornými výhodami vakuových vypínačů je jejich nehořlavost, tichost a také velmi krátká vypínací dráha (v řádech desítek milimetrů) a díky tomu také celkově malé rozměry. Zřejmou nevýhodou je nutná mechanicky pevná a vakuově těsná nádoba, náročnost zachování vysoké čistoty a kvality vakua po celou dobu provozu vypínače a také obtížné technologické zpracování materiálů na kontakty.

Svoji technologií zhášení oblouku je vakuový vypínač z hlediska časové závislosti vypínací schopnosti poměrně robustní. Vypínač má delší vypínací schopnost, protože není ovlivněna žádným proudícím médiem. Po oddálení kontaktů dosáhne vypínač své maximální vypínací schopnosti, kterou je schopen garantovat po dobu několika period, během

nichž obvykle vypíná. Ovšem dlouhým působením vysokých teplot a difúzního oblouku dojde k odparu materiálu z kontaktů a degradaci zhášecí komory, čímž je vypínací schopnost při dalším vypínání snížena.

Výhodou vakuových vypínačů je jejich téměř bezúdržbový provoz, malá zhášecí energie (dána malým katodovým úbytkem) a spolehlivost při vypínání. Zároveň jsou poměrně kompaktní. Mezi nevýhody patří složitá konstrukce (vysoké nároky na materiály, odstínění zhášecí komory), zároveň je nelze spojovat do série, čili jejich použití je napěťově omezeno do 72,5 kV. Protože vakuový vypínač vypíná bezprostředně po oddálení kontaktů, tedy mimo proudovou nulu, tak při vypínání induktivních proudů hrozí velká přepětí.

Výrobou a vývojem vakuových vypínačů se zabývá celá řada klasických výrobců a dodavatelů elektrických přístrojů pro energetiku. Mezi hlavní dodavatele patří Siemens se svou nejvyspělejší řadou SION VCB (7,2 až 24 kV) uvedenou v roce 2006, ABB se svým nejpopulárnější vypínačem typu VD4 (12 až 36 kV), firma Eaton a například také původní česká firma SERW, spol. s r. o., která nabízí vypínače (jednopolové řady CVD i třipolové řady CVT) pro venkovní i vnitřní užití pro napětí 27,5 kV a 38,5 kV.

5.4 Vypínací schopnost vypínačů s plynem SF₆

Tlakoplynové vypínače s fluoridem sírovým jsou svým principem velmi podobné tlakovzdušným vypínačům, ale využívají výhodných fyzikálních vlastností tohoto plynu. Fluorid sírový:

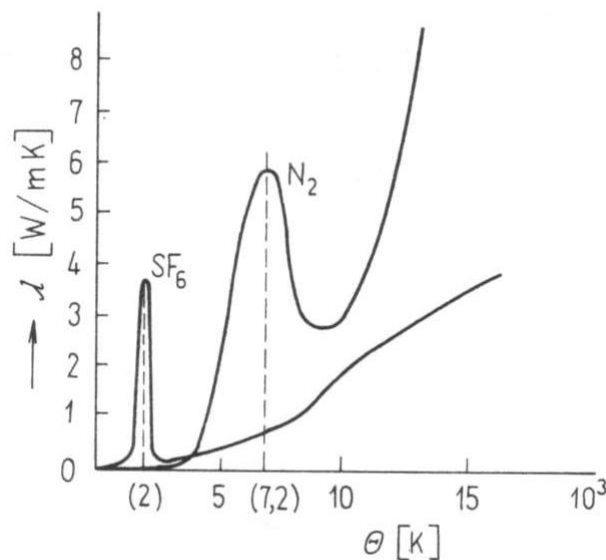
- má vyšší elektrickou pevnost než vzduch (při tlaku 2,5 MPa cca 125 kV/cm),
- je přibližně 5x těžší než vzduch,
- má větší tepelnou vodivost, čili lepší odvod tepla,
- je chemicky stálý,
- je bezbarvý, bez zápachu, nejedovatý, nedýchátný.

V průmyslu se začal SF₆ využívat v hornictví, ve 30. letech se začal hojně využívat pro elektrotechnické aplikace a jako zhášecí medium při spínacích procesech byl prvně použit v roce 1953.

Pro uhasnutí spínacího oblouku je nutné, aby proudící plyn plazma oblouku dostatečně ochladil. Po uhasnutí oblouku je však zhášecí komora namáhána zotaveným napětím s obecně vysokou strmostí. V tomto krizovém okamžiku po uhasnutí oblouku je mezi kontakty zbytkové plazma s určitým počtem volných elektronů. Ty mohou začít tvořit laviny nebo striméry a jiskrový výboj pak může způsobit zpětný zápal oblouku. Důležitou vlastností plynného zhášecího média je tedy chladicí schopnost, o níž vypovídá jeho měrná tepelná kapacita a hustota. Ač má SF₆ měrnou tepelnou kapacitu malou, tak

díky své hustotě a tepelné vodivosti má vynikající chladicí vlastnosti. Tepelná vodivost je způsobena těmito dvěma jevy [1]:

- odvod kinetické energie plynu při vzájemných srážkách molekul rozkmitaných tepelnou energií plynu,
- disociací molekul, kdy při jejich rozkladech na základní atomy se při nepružných srážkách pohlcuje disociační energie a tím se kinetická energie molekul přeměňuje na potenciální energii atomů. Ta se pak odvádí difúzí do oblasti s nízkou teplotou. Disociace molekul je jev, který podstatně zvyšuje tepelnou vodivost plynů.

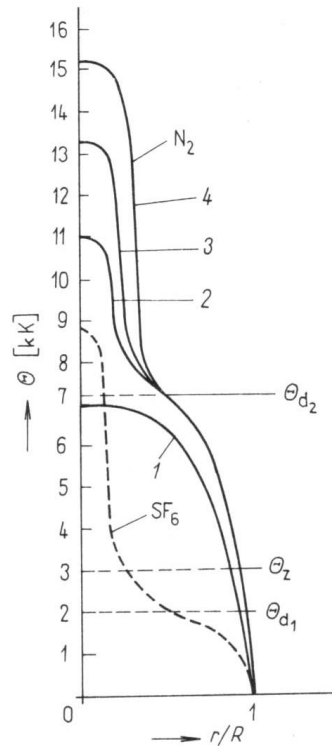


Obr. 5.3: Tepelná vodivost fluoridu sírového (SF_6) a dusíku (N_2) v závislosti na teplotě.

[Převzato z [1]]

Disociace molekul ale nastává jen v úzkém teplotním intervalu charakterizovaném *disociační teplotou* Θ_d . Proto je v závislosti tepelné vodivosti na teplotě znatelné maximum právě v oblasti disociační teploty. Fluorid sírový má disociační teplotu okolo 2500 K a dusík (resp. vzduch) okolo 7500 K. Závislost tepelné vodivosti na teplotě tak dává představu o prostorovém rozložení teplot v hořícím oblouku. V okolí disociační teploty, kde je tepelná vodivost maximální je minimální teplotní spád. Disociační teplota nám tak rozděluje hořící oblouk do dvou rozdílných oblastí:

- vnitřní oblast, velmi jasně zářící s vysokými teplotami ležícími nad Θ_d , tzv. *trup oblouku*,
- vnější oblast, difúzně svítivá část s teplotami pod Θ_d , tzv. *plášť oblouku*.



Obr. 5.4: Průběh teplot oblouku v závislosti na poloměru (křivky 1 až 4 jsou pro různé hodnoty proudu). [Převzato z [1]]

Další důležitou vlastností disociační teploty je její vliv na rychlost úbytku hustoty elektronů ve zbytkovém plazmatu. Ve žhavém trupu oblouku je úbytek hustoty elektronů až stokrát rychlejší, než v plášti. Při vypínání tak v nule proudu zanikne trup oblouku téměř okamžitě a zotavené napětí působí jen na plášť oblouku. Na obr. 5.4 je Θ_z zápalná teplota zhruba 3000 K. To odpovídá kritické hustotě elektronů $10^{14}/m^3$, která je rozhodující pro vznik elektrického výboje v plynném prostředí. Porovnáním velikostí Θ_z a Θ_d pro oba plyny lze odvodit, že v plynu SF_6 bude oblouk tvořen převážně pláštěm, protože trup oblouku bude malý ($\Theta_{zSF_6} > \Theta_d$), naopak v N_2 bude poloměr trupu oblouku znatelně vyšší. Zároveň srovnáním disociačních teplot obou plynů lze vysvětlit, proč jsou chladicí vlastnosti fluoridu sírového výhodné. [1]

Vývoj tlakoplynových vypínačů probíhal v jednotlivých generacích. Vypínač první generace byly analogií tlakovzdušných vypínačů a využívali tzv. dvoutlaký princip – kompresor zajišťoval potřebný tlak plynu ve zhášedlech na cca 2 MPa, za zhášedly tlak 0,4 MPa. Jejich nevýhodou byla složitost celého zařízení a nutnost udržovat teplotu stlačeného plynu v daných mezích. Vypínače druhé generace (nazývané *puffer type*) už měly konstantní tlak 0,5 až 0,7 MPa, který při vypínání vzrostl. Vypínače třetí generace (*self-blast*) jsou v současné době nejrozšířenějším typem. K natlakování plynu využívají vlastní energie oblouku (tepelná energie oblouku → zahřívání a rozpínání plynu → růst tlaku ve zhášecí komoře). Touto zápornou zpětnou vazbou je vypínací schopnost zajištěna jednak výhodami fluoridu sírového, ale i vytvořením potřebného tlaku v závislosti na

procházejícím proudem a hořícím obloukem. Toto však neplatí v případě vypínání "malých" proudů, kdy oblouk nedokáže natlakovat plyn, který tak nestačí uchládit hořící oblouk. Tento nedostatek řeší vypínače čtvrté generace, které mají přídatnou komoru s pístem, což zajišťuje pomocnou kompresi. [10]

Protože vypínače třetí generace jsou v současné době nejpoužívanější, dále bude popsán jejich vypínací proces. V zapnuté poloze jsou spojeny vnější kontakty hlavní proudové dráhy a vnitřní opalovací kontakty, napětí vypínače je téměř nulové (dáno velmi malými přechodovými odpory) a ve zhasací komoře je konstantní tlak. Po zapůsobení ochran dojde k vybavení pohonu, který pomocí táhel začne rozpojovat kontakty. Nejprve se rozeprnou vnější kontakty a proud komutuje na vnitřní opalovací kontakty. Po jejich rozpojení začne hořet elektrický oblouk, který zahřívá okolní plyn a ten díky tlakovým změnám začne proudit do výfuků a kompresní komory. K intenzivnímu proudění však dojde až v momentě, kdy roubík uvolní hrdlo teflonové trysky. Tato tryska je konstruována jako Lavalova dýza – za hrdlem trysky je vlivem rozšiřujícího průřezu a poklesu tlaku dosahováno nadzvukové rychlosti proudění. Proudící plyn tak intenzivně chladí hořící oblouk. Po uhasnutí oblouku v proudové nule plyn stále proudí a pomáhá tak ochlazovat zbytkové plazma s volnými elektrony. Pokud je v každém okamžiku elektrická pevnost mezi kontakty vyšší než kritická elektrická pevnost daná zotaveným napětím, při kterém by došlo k průrazu, vypínací proces je u konce. Kontakty mají maximální zdvih a dojde k vyrovnání tlaku a teploty ve zhasací komoře.

Tlakoplynové vypínače tak mají oproti tlakovzdušným jednak díky pozitivním vlastnostem plynu SF₆ a jednak díky principu zhasení oblouku zdatně vyšší vypínací schopnost (až dvojnásobnou), přičemž hmotnost a energie pohyblivých částí jsou srovnatelně nižší (zhruba poloviční).

5.5 Generátorový vypínač

Díky své aplikaci tvoří generátorové vypínače jedinečnou skupinu ve spínací technice. Generátorové vypínače bývají zapojeny mezi generátor a zvyšovací transformátor. V celém průběhu proudu musí umět zajistit synchronizaci generátoru se soustavou, vypnout nezátížený generátor, spolehlivě přerušit jmenovité i zkratové proudy či vypnout za nesymetrických fázových podmínek.

Na generátorové vypínače jsou kladeny vysoké požadavky, jak z hlediska vysokých vypínaných parametrů, tak všestrannosti a spolehlivosti. Potřeba specializovat vypínače k elektrárenským blokům se naplno projevila v 70. letech s cílem chránit velké energetické celky. V současné době s rozvojem malých průmyslových a komerčních zdrojů a rozptýlené výroby přibývá možností jejich aplikace, což rozšiřuje spektrum vypínaných výkonů na všech napěťových hladinách.

Problematikou návrhu, konstrukce a použití generátorových vypínačů se zabývá světová studijní komise IEEE C37.013.



Obr. 5.5: Generátorový vypínač typ HECS-130XXLp výrobce ABB. [Převzato z [19]]

5.6 Problematika narušeného vypínání

Pojem *narušené vypínání* je v energetické praxi poměrně nový, a to převážně z důvodu velice nízké pravděpodobnosti tohoto jevu. Tímto pojmem rozumíme běžné provozní vypínání, v jehož průběhu dojde ke vzniku nesymetrického zkratu. Vlivem nesymetrie pak dojde k prodloužení intervalů mezi jednotlivými průchody proudu nulou. To znamená, že k těmto průchodům dochází až v časech, kdy je vypínací schopnost omezena, či dokonce poklesla na nulovou hodnotu. Tento statisticky náhodný jev je způsobený časovou souhrou nepříznivých a navzájem nezávislých jevů elektrických i mechanických.

Narušené vypínání obvykle končí selháním vypínače, což může ohrozit blízké zařízení, jednak v rámci sítě i v rámci rozvodny, kde je vypínač umístěn. Nicméně je velice obtížné identifikovat konkrétní případy, kdy k narušenému vypínání došlo, protože je potřeba oscilografický záznam procházejícího proudu přesně v okamžiku výskytu tohoto vypínání, společně s aktuálními toky popudových členů z ochran či jiných vstupních zařízení. Sběr a archivace takového množství dat (v rozlišení jednotek milisekund) je při současném stavu měřících technologií velice nepraktické. V nedávné historii je však několik prokázaných výskytů narušeného vypínání. Jedním z nejznámějších je incident v brazilsko-paraguayské vodní elektrárně Itaipú. Díky výskytu narušeného vypínání došlo k havárii vypínače, což mělo za následek výpadek jednoho bloku této elektrárny. To významně ovlivnilo stabilitu přenosu v části brazilské elektrizační soustavy.

Jedním z nejvýznamnějších důsledků narušeného vypínání je zpožděný průchod proudu nulou (resp. delší intervaly mezi průchody nulou), což je přímo spojeno s nesymetrií zkratových proudů.

6

Namáhání vypínače při generátorových zkratech

V následující kapitole proběhne rozbor namáhání generátorového vypínače při průchodu proudu nulovou hodnotou pro různé asymetrie zkratového proudu. Výchozím bodem bude rovnice 4.7, kdy parametrem pro velikost asymetrie bude veličina α_0 . Ta totiž určuje okamžik vzniku zkratu, čímž ovlivňuje vývin stejnosměrné složky, tedy i velikost asymetrie. Postup bude následující:

1. Dosazení do rovnice 4.7 a vykreslení zkratového proudu.
2. Odečtení času t_0 a stanovení strmosti proudu.
3. Stanovení strmosti zotaveného napětí a limitní strmosti zotaveného napětí pro vypínač.
4. Vyhodnocení a diskuse výsledků v pojmenovaných či poměrných jednotkách.

6.1 Parametry zkoumaných generátorů

Pro zhodnocení namáhání generátorového vypínače jsem zvolil analýzu pro dva stroje se srovnatelnými výkony a napěťovými hladinami. Prvním je turboalternátor 110 MW z Elektrárny Pruněřov, druhým je hydroalternátor 115 MW z přečerpávací vodní elektrárny Dalešice. Parametry byly získány z [9].

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
$U_n =$	13,8 kV	$x_d'' =$	0,156 p.u.	$R =$	0,00236 Ω
$P_n =$	110 MW	$x_d' =$	0,247 p.u.	$R_f =$	0,21 Ω
$S_n =$	137,5 MVA	$x_d =$	2,18 p.u.	$T_d'' =$	0,025 s
$\cos \varphi =$	0,8	$x_q'' =$	0,156 p.u.	$T_d' =$	0,7 s
$I_n =$	5753 A	$x_q =$	2,06 p.u.	$T_a =$	0,3 s

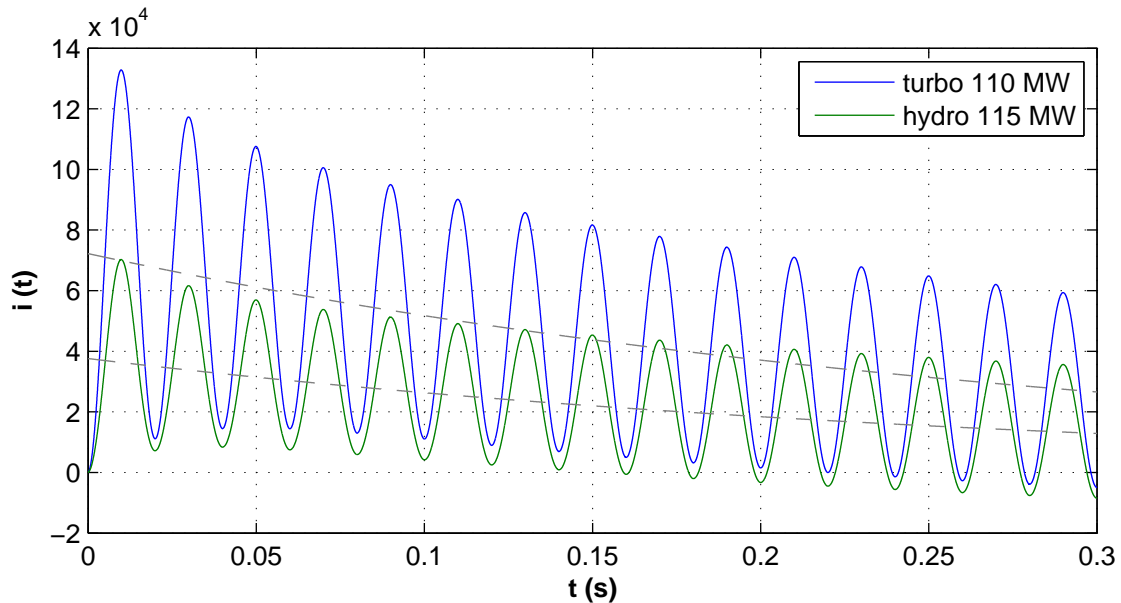
Tab. 6.1: Parametry turboalternátoru Pruněrov 110 MW

Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota	Veličina	Hodnota
$U_n =$	13,8 kV	$x_d'' =$	0,29 p.u.	$R =$	0,00494 Ω
$P_n =$	115 MW	$x_d' =$	0,48 p.u.	$R_f =$	0,129 Ω
$S_n =$	127,8 MVA	$x_d =$	1,16 p.u.	$T_d'' =$	0,02 s
$\cos \varphi =$	0,9	$x_q'' =$	0,31 p.u.	$T_d' =$	2,3 s
$I_n =$	5350 A	$x_q =$	0,77 p.u.	$T_a =$	0,28 s

Tab. 6.2: Parametry hydroalternátoru Dalešice 115 MW

6.2 Namáhání vypínače při vypínání

Protože generátorové vypínače v naprosté většině využívají technologie s plynem SF₆, tak vypínají v nulové hodnotě proudu, pokud tato nulová hodnota nastala v okamžiku dostatečné vypínací schopnosti. Toto však zcela evidentně nebude splněno při maximální stejnosměrné složce. Ta posune průběh v obou případech nad osu tak, že k prvnímu průchodu proudu dojde až v čase 0,21992 s v případě turboalternátoru, resp. 0,15926 s v případě hydroalternátoru (viz. obr. 6.1).



Obr. 6.1: Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 0^\circ$, s vyznačenou ss. složkou

Z uvedeného obrázku lze odvodit několik faktů. Pokud ke vzniku zkratu dojde v nejhorším okamžiku, tak průchod proudu zcela mine interval plné vypínací schopnosti. Jak se bude zvyšovat úhel α_0 , stejnosměrná složka bude klesat a okamžik prvního průchodu proudu nulou se bude zkracovat. Nejprve jen velmi málo, ale od určitého úhlu už dojde k průchodu proudu nulou během první záporné půlperrody. Takový skok je způsoben tím, že prvních několik amplitud je znatelně vyšších kvůli působení rázové složky. Průběhy jednotlivých případů jsou uvedeny jako přílohy A.1 až A.9 na konci této práce.

6.2.1 Derivace zkratového proudu

Zderivováním výrazu 4.7 dostaneme následující vztah, kam za čas t dosadíme odečtený okamžik t_0 :

$$\begin{aligned} \frac{di(t)}{dt} = & -\sqrt{2}E \cos(\omega t + \alpha_0) \cdot \left[\left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \cdot \frac{1}{T'_d} \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x''_d} \right) \cdot \frac{1}{T''_d} \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] - \\ & -\sqrt{2}E\omega \sin(\omega t + \alpha_0) \cdot \left[\left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x''_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} - \frac{1}{x_d} \right] - \\ & -\frac{\sqrt{2}E}{2} \cos(\alpha_0) \cdot \left(\frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x'_q} \right) \cdot \frac{1}{T_a} \cdot e^{-\frac{1}{T_a}} \end{aligned} \quad (6.1)$$

6.2.2 Zotavené napětí generované obvodem

Jak bylo popsáno v kapitole 3.4, průběh zotaveného napětí po přerušení proudu je závislý na zkratovém obvodu, vypínací disciplíně a velikosti vypínaného proudu. Pro případ namáhání generátorového vypínače však není žádná matematicky přesně popsatelná závislost mezi strmostí zotaveného napětí (často označované zkratkou RRRV z angl. *rate of rise of recovery voltage*) a strmostí proudu v okamžiku vypnutí. Bylo však provedeno mnoho experimentů a zkoušek, z nichž lze tuto závislost prakticky odvodit.

System-source fault

Při zkratu mezi generátorovým vypínačem a generátorem dodává zkratový výkon zejména soustava. Takové poruše se říká *system-source fault*, neboli porucha na straně generátoru. Proudové takových zkratů jsou obecně nejvyšší (zdrojem zkr. proudu je zde blokovaný transformátor), protože impedance transformátoru je obecně nižší než impedance generátoru. Narozdíl od aplikací běžných vypínačů je v tomto případě i nejprudší nárůst zotaveného napětí, dle obr. 6.2 zhruba $5,25 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

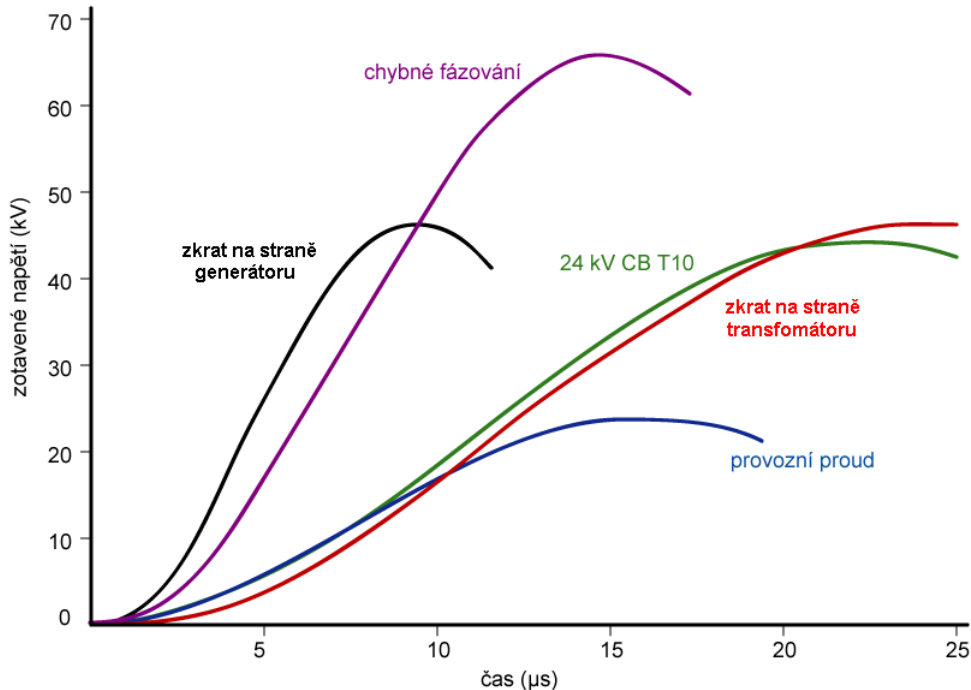
Generator-source fault

Tímto označením se rozumí zkrat na straně transformátoru. Zdrojem zkratového výkonu je generátor. Díky vypínacímu oblouku, který reaguje na zkrat je částečně snížena hodnota RRRV, což je způsobeno úbytky na tomto oblouku, který má charakter činného odporu. Zotavené napětí je dále tlumeno poměrně velkou vnitřní kapacitou generátoru, díky čemuž je počáteční strmost bezmála poloviční, než v předchozím případě. Dle obr. 6.2 zhruba $2 \text{ kV}/\mu\text{s}$.

Vypínání při chybném fázování

Tento typ vypínání se označuje termínem *out-of-phase switching* a charakteristiky zotaveného napětí jsou závislé na úhlu mezi fázory napětí, které primárně udává obtížnost vypínání. Z hlediska RRRV je vypínání při chybném fázování srovnatelné s vypínáním zkratu na straně generátoru, ale zotavené napětí dosahuje vyšších vrcholových hodnot.

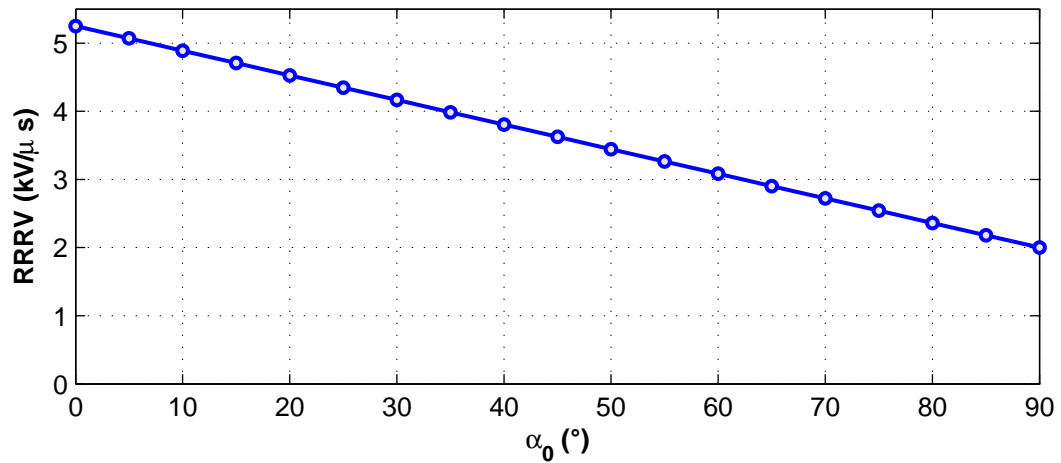
Porovnání průběhů zotavených napětí pro uvedené případy a případ svorkového zkratu běžného vypínače je na obr. 6.2



Obr. 6.2: Průběh zotavených napětí generátorového vypínače pro jedn. druhy zkratu [Převzato z [18]]

Obr. 6.2 zobrazuje popsané situace, které musí generátorový vypínač zvládat. Je vidět, že z hlediska u_{zn} jsou na generátorový vypínač kladeny vyšší požadavky než na běžný, vysokonapěťový vypínač umístěný v síti. Toto dokládá i zelená křivka znázorňující průběh u_{zn} pro vypínací disciplínu svorkového zkratu s vypínaným proudem 10% jmenovitého vypínacího proudu (disciplína TF10 udává dle normy IEC 62271-100 nejstrmější průběh u_{zn} pro standardní vypínač).

Protože proudy při zkratech na str. generátoru dosahují vyšších hodnot, což platí i pro asymetrické zkraty, tak pro případ plné asymetrie budeme uvažovat $RRRV = 5, 25 \text{ kV}/\mu\text{s}$, naopak při zkratech na straně transformátoru dosahují proudy nižších hodnot s RRRV okolo $2 \text{ kV}/\mu\text{s}$. Závislost RRRV na velikosti asymetrie je na obr. 6.3, který vychází z experimentů provedených na základě mezinárodních standardů komise IEEE C37.013.



Obr. 6.3: Závislost RRRV na velikosti asymetrie ($\alpha_0 = 0^\circ$ pro plný asym. zkrat, $\alpha_0 = 90^\circ$ pro symetrický)

6.2.3 Porovnání dosažených výsledků

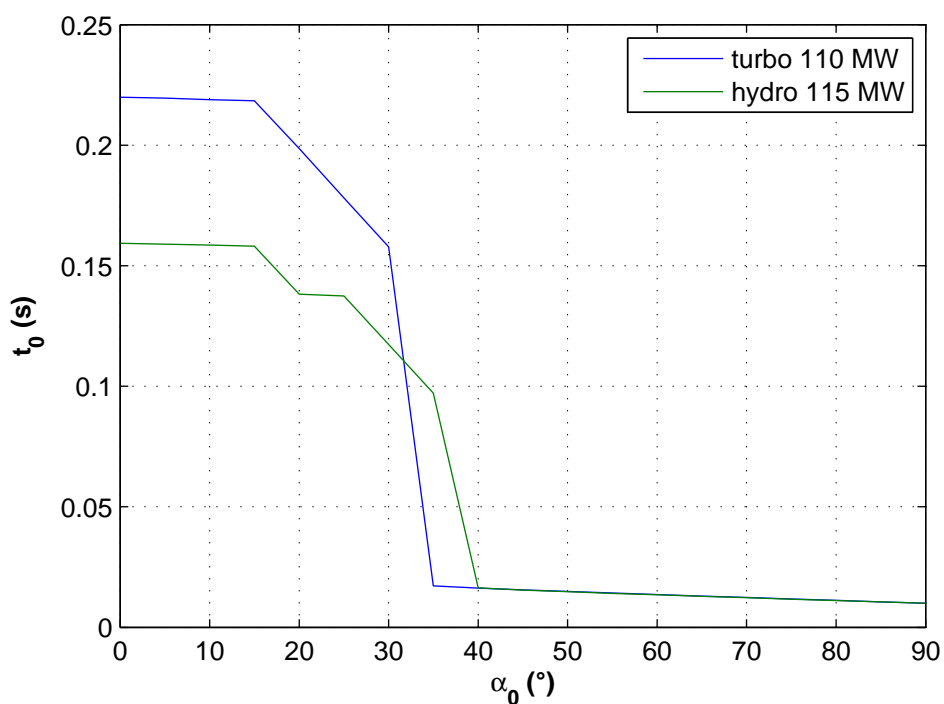
Na následujících stránkách jsou uvedeny získané výsledky, ze kterých se pak stanoví obecné závěry pro použití generátorových vypínačů.

α_0 [°]	t_0 [ms]	$(di/dt)_{t_0}$ [A/ μ s]	$(du_{zn}/dt)_{t_0}$ [kV/ μ s]	Namáhání vypínače [kVA/ μ s ²]
0	219,92	-0,35	5,25	1,82
5	219,53	-0,73	5,07	3,71
10	218,92	-1,86	4,89	9,11
15	218,37	-2,78	4,71	13,08
20	198,63	-0,98	4,53	4,45
25	178,11	-1,88	4,35	8,15
30	157,85	-1,86	4,17	7,74
35	17,18	-4,57	3,99	18,21
40	16,31	-7,81	3,81	29,73
45	15,57	-10,20	3,63	37,01
50	14,89	-12,16	3,44	41,88
55	14,24	-13,82	3,26	45,11
60	13,61	-15,24	3,08	47,00
65	12,99	-16,47	2,90	47,82
70	12,38	-17,50	2,72	47,65
75	11,78	-18,34	2,54	46,61
80	11,18	-18,99	2,36	44,86
85	10,59	-19,46	2,18	42,45
90	10,00	-19,75	2,00	39,51

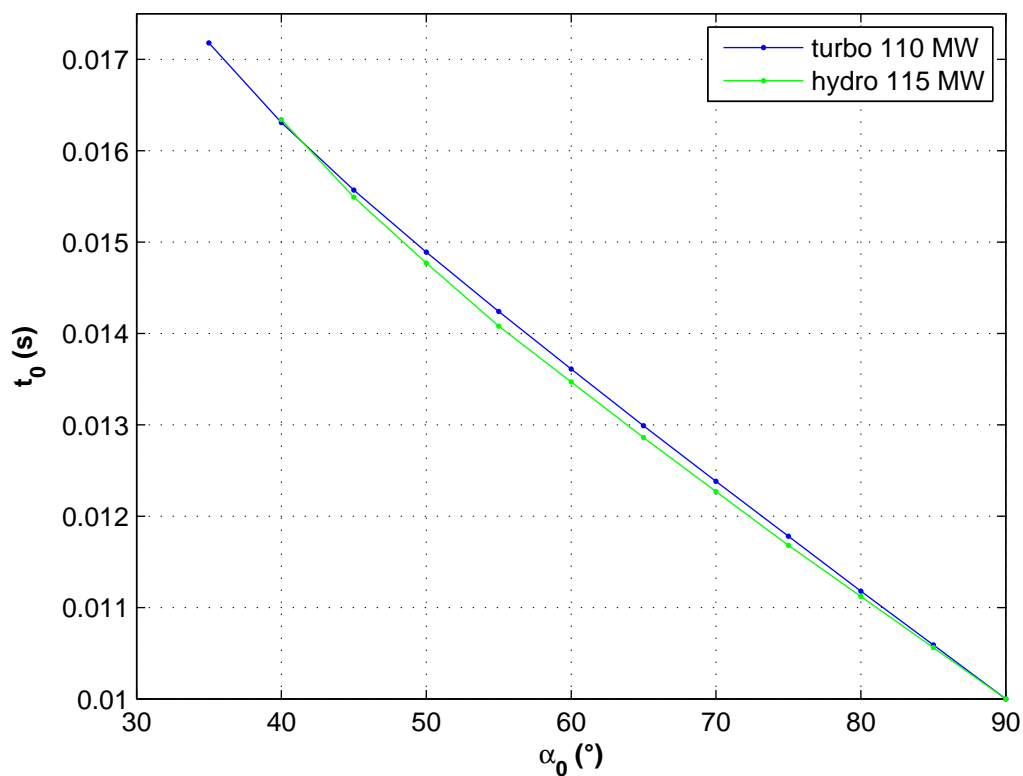
Tab. 6.3: Porovnání výsledků pro turboalternátor

α_0 [°]	t_0 [ms]	$(di/dt)_{t_0}$ [A/ μ s]	$(du_{zn}/dt)_{t_0}$ [kV/ μ s]	Namáhání vypínače [kVA/ μ s ²]
0	159,26	-1,70	5,25	8,94
5	158,91	-1,86	5,07	9,42
10	158,58	-1,97	4,89	9,64
15	158,15	-2,29	4,71	10,80
20	138,17	-1,67	4,53	7,55
25	137,44	-2,63	4,35	11,44
30	111,39	-2,16	4,17	9,02
35	97,16	-2,07	3,99	8,27
40	16,34	-3,92	3,81	14,93
45	15,49	-5,45	3,63	19,76
50	14,77	-6,54	3,44	22,52
55	14,08	-7,46	3,26	24,35
60	13,47	-8,13	3,08	25,07
65	12,86	-8,72	2,90	25,32
70	12,27	-9,20	2,72	25,07
75	11,68	-9,61	2,54	24,43
80	11,12	-9,90	2,36	23,40
85	10,56	-10,14	2,18	22,10
90	10,00	-10,28	2,00	20,57

Tab. 6.4: Porovnání výsledků pro hydroalternátor

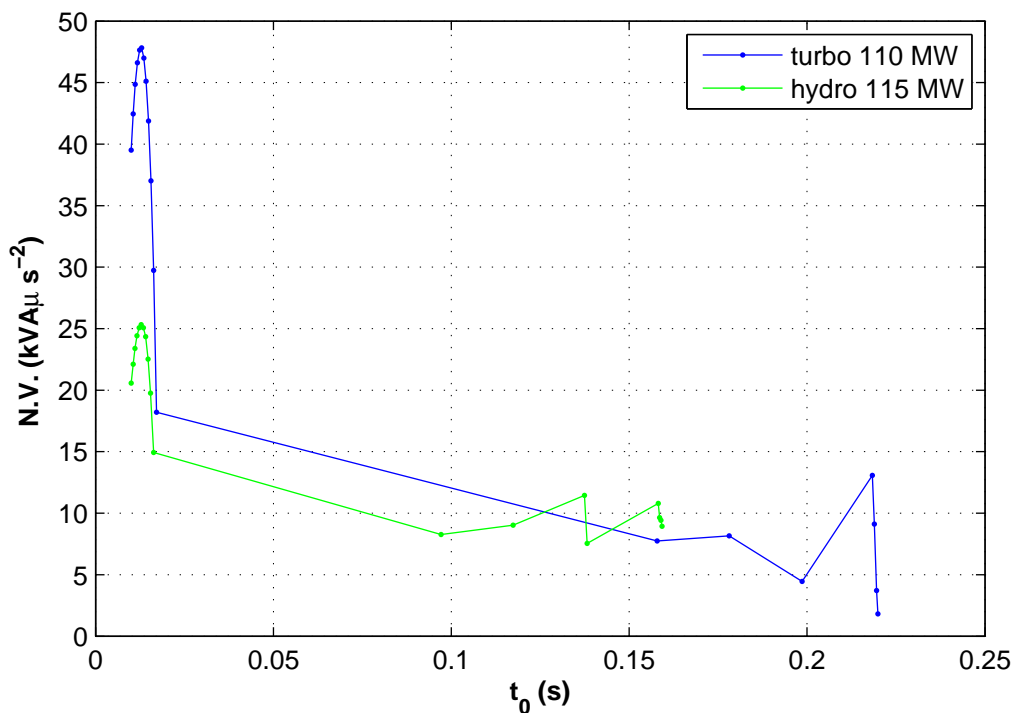


(a) celkový průběh

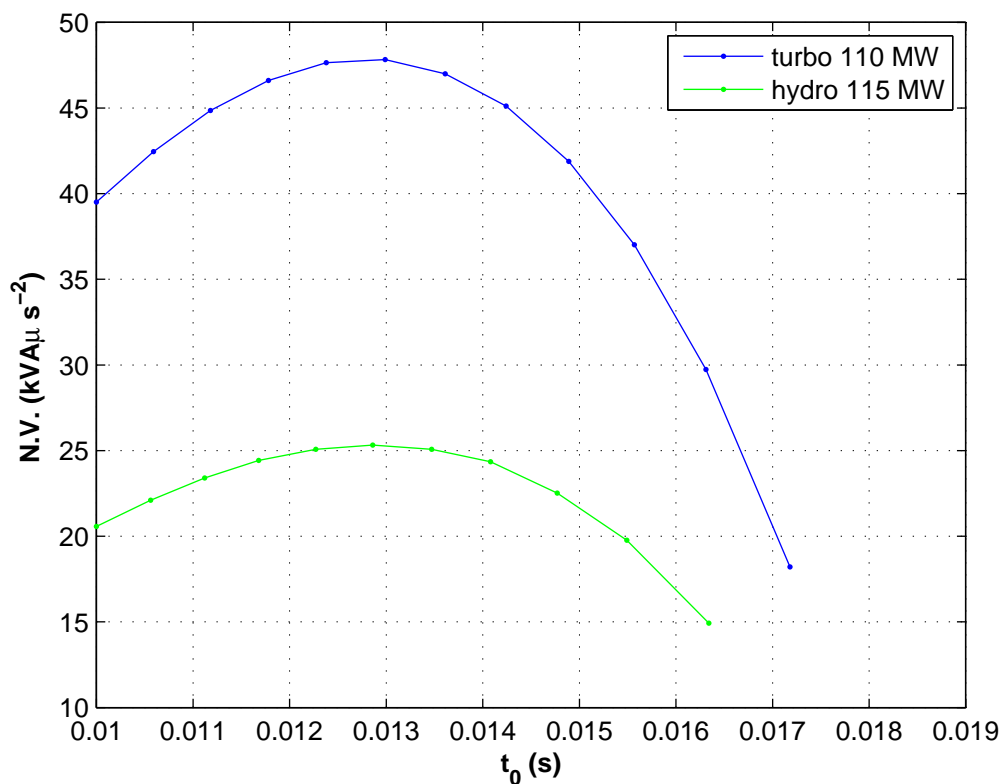


(b) detailní pohled

Obr. 6.4: Závislost doby prvního průchodu nulou jako funkce asymetrie (úhlu α_0)

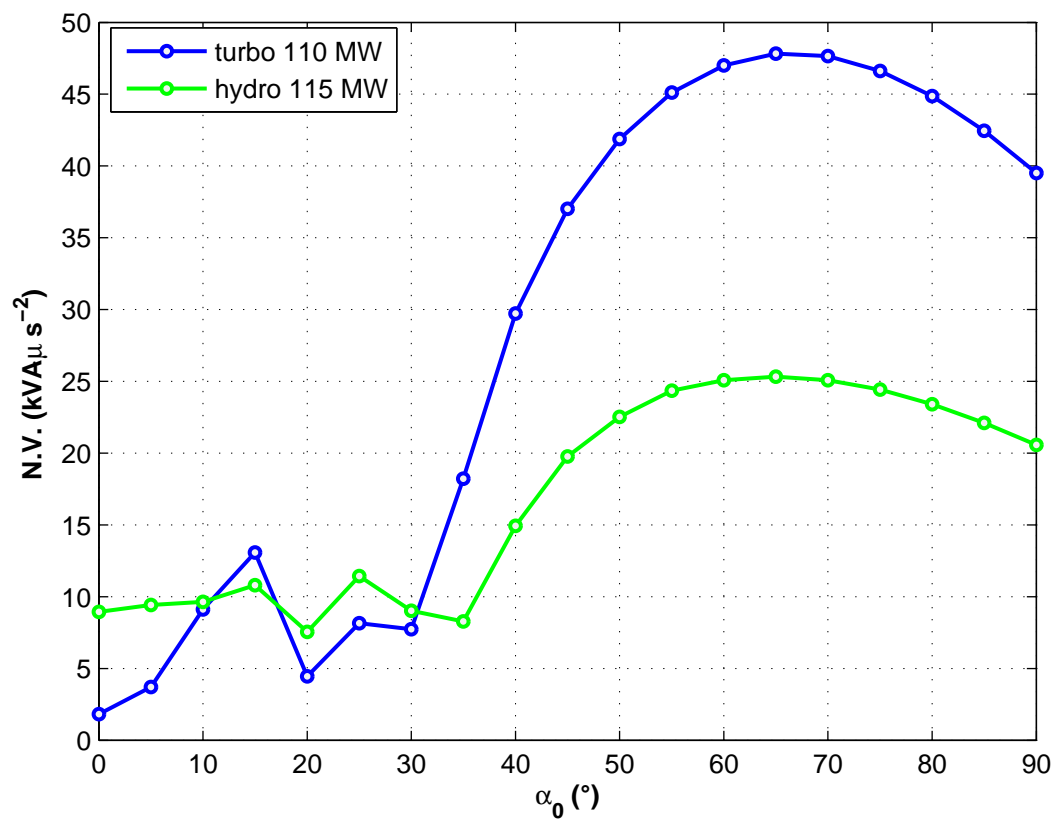


(a) celkový průběh

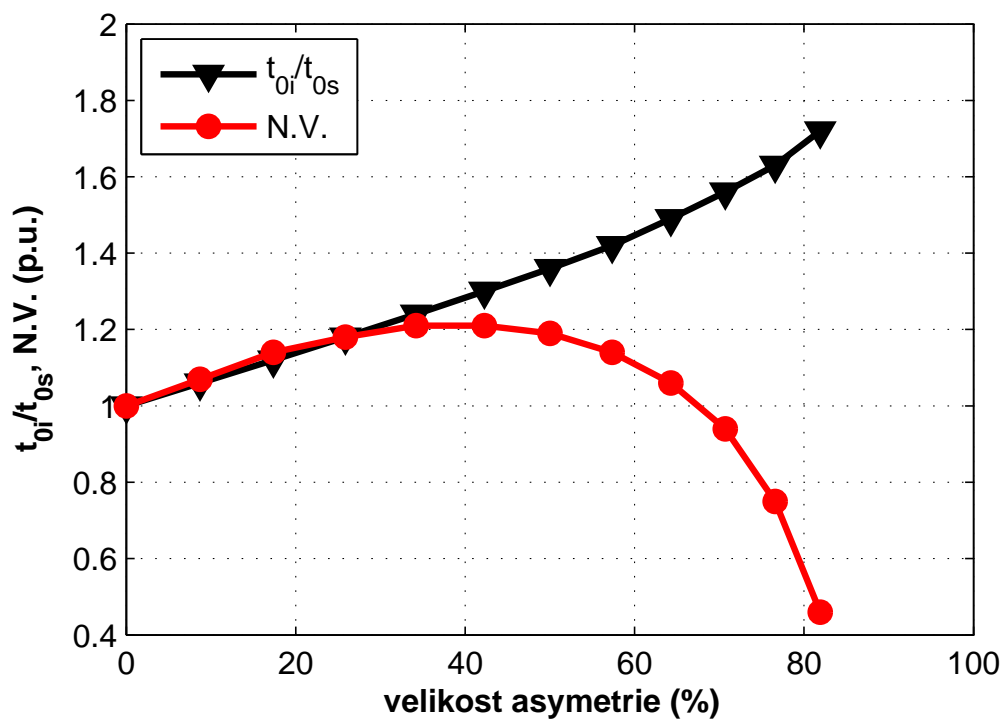


(b) detailní pohled

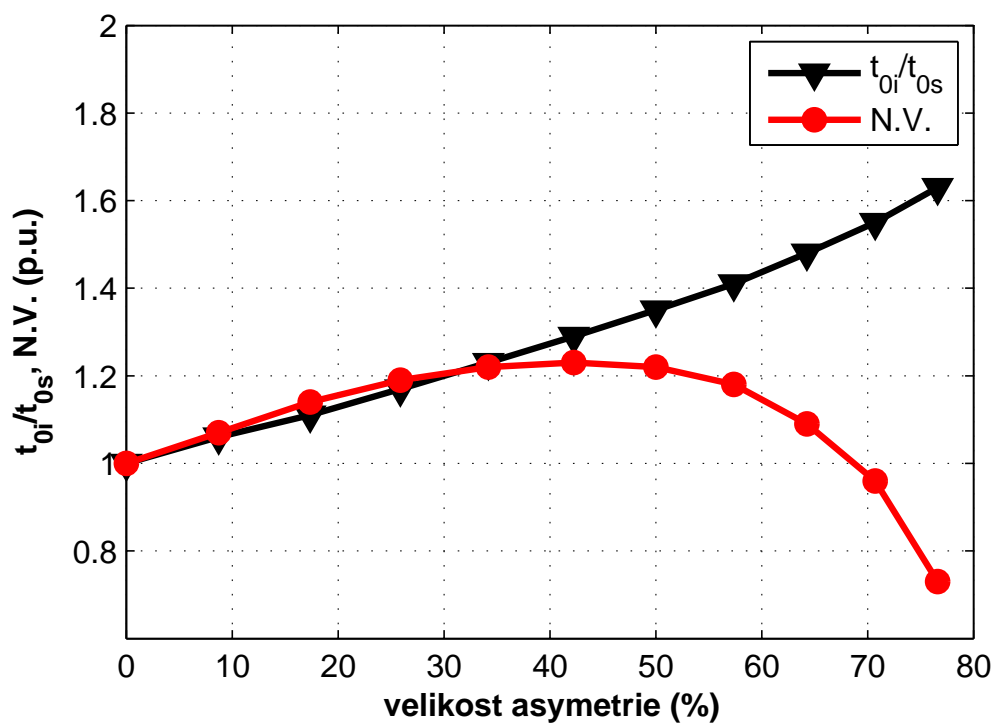
Obr. 6.5: Závislost namáhání vypínače jako funkce doby prvního průchodu nulou



Obr. 6.6: Závislost namáhání vypínače jako funkce asymetrie (úhlu α_0)



(a) turboalternátor



(b) hydroalternátor

Obr. 6.7: Závislost poměrné doby do průchodu nulou a poměrného namáhání vypínače na velikosti asymetrie (vztaženo k symetrickému proudu)

6.3 Závěry vyplývající z teoretického modelu

Na tomto místě je vhodné provést diskusi použitého modelu a jeho soulad s praktickými aplikacemi či zohledňování v mezinárodních normách.

Jak je patrné z průběhů, zkratový proud turboalternátoru dosahuje znatelně vyšších hodnot, než zkratový proud hydroalternátoru a to i přes to, že na stejné napěťové hladině má nižší činný výkon. Při plně asymetrickém zkratu má proud turboalternátoru maximální hodnotu 132 kA , zatímco hydroalternátor 70 kA . Při symetrickém zkratu je to 67 kA v případě turboalternátoru a 36 kA v případě hydroalternátoru.

Dále lze vidět, že v případě asymetrických zkratů, kdy platilo $\alpha_0 \in (0; 35)$, k prvnímu průchodu nulou došlo až po mnoha periodách, v časech řádově okolo stovek setin sekundy. To je prakticky nereálný příklad; není možné, aby k vypnutí proudu došlo s takovým zpožděním. V obrázcích se to projeví tak, že funkční hodnoty pro úhly $\alpha_0 \in (0; 35)$ a časy $t_0 > 20\text{ ms}$ nemají reálné fyzikální opodstatnění. Problémem je, že rovnice 4.7 zohledňuje pouze děje v alternátoru. Při vypínání se však projeví činný odpor spínacího oblouku, který významně ovlivní konstantu statorového vinutí T_a . Čím bude větší činný odpor zkratového obvodu, tedy i obvodu se statorovým vinutím, tím více bude konstanta T_a klesat a stejnosměrná složka tak odezní rychleji. Tato důležitá skutečnost naznačuje, že při poruchách, které se běžně v síti vyskytují, nebude mít stejnosměrná složka takový efekt, jako při poruchách, které jsou elektricky blízké generátoru.

7

Modelování soustavy s generátorovým vypínačem

7.1 Metodika modelování částí soustavy

V této kapitole budou uvedeny dva počítačové modely pro získání výsledků pomocí jiné metody. Uvedené modely by měly rovněž názorně představit a vyhodnotit možnosti výskytu narušeného vypínání či průchodů proudu nulou v delších časových intervalech.

Jak již bylo zmíněno, průběhy proudů či jiných veličin jsou u alternátorů silně závislé na vstupních předpokladech. To samé lze říci i o modelování elektrotechnických celků. Je nutné postupovat tak, aby každý prvek v modelu měl své opodstatnění a znatelný vliv na výsledek a zároveň aby model plně respektoval modelovanou realitu. Vstupní předpoklady, volba a konstrukce modelu a získané či odvozené závěry spolu musejí korespondovat. Jde tedy o poměrně složitý proces, před jehož začátkem by mělo být při nejmenším stanoveno, jaké výsledky jsou očekávány.

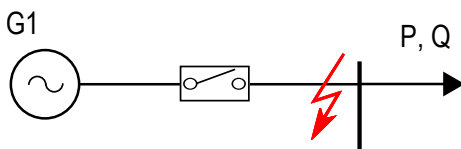
Zvolil jsem vypracování dvou obvodů – prvním bude jednoduchý obvod pro simulování generátorového zkratu (generátor - zkrat), druhým bude model části elektrizační soustavy 400 kV s několika přispívajícími alternátory, transformátory a vedeními, přičemž zkrat se objeví na přípojnicích fiktivní rozvodny. Oba dva modely budou zkoumat průběh proudu při 1f i 3f zkratech. Modely byly zpracovány s využitím programu Matlab a jeho nástavbového nástroje Simulink s aplikační knihovnou SimPower Systems, jež je určena pro energetické aplikace.

Pro vypracované modely jsem volil připravené prvky z dané knihovny – stroje jsou modelovány prvkem *Synchronous Machine - pu Standard*. Ten věrně zohledňuje děje v alternátoru, jak bylo popsáno v kapitole 4. Pro modelování transformátorů byl použit prvek *Three-phase Transformer 2-windings pu*, který znázorňuje transformátor dle konvenčního náhradního schématu a jeho pasivní parametry jsou definovány v poměrných jednotkách. Vedení jsem simuloval sériovým spojením činného odporu a induktivní reaktance.

Funkční bloková schémata sestavených modelů jsou uvedena jako přílohy B.1 a B.2.

7.2 Model generátorového vypínače

Schéma řešeného obvodu v tomto modelu je na obr. 7.1. Odběr PQ je proveden jako 3f RL zátěž v podobě transformátoru se zdánlivým výkonem 160 MVA, který bývá obvyklý u alternátorů těchto výkonů.

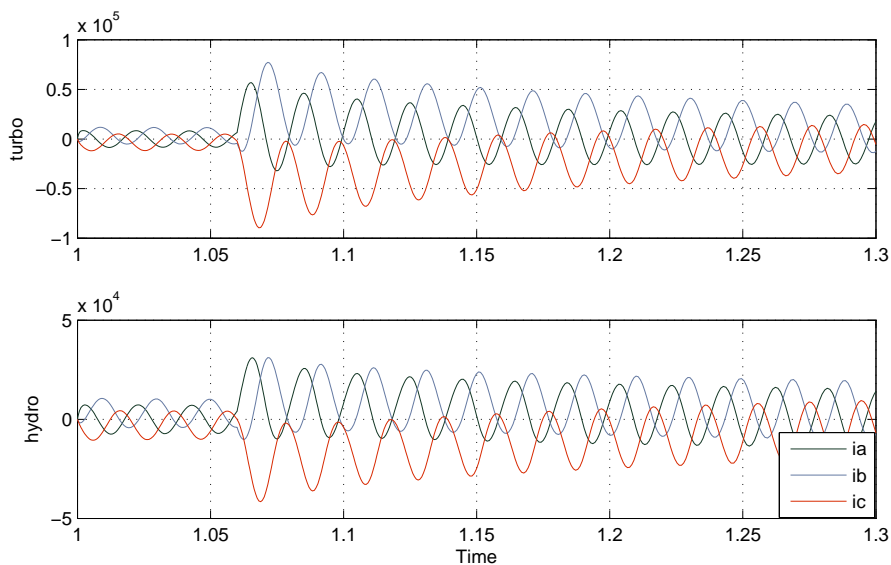


Obr. 7.1: Schéma obvodu s generátorovým vypínačem

7.2.1 Třífázový generátorový zkrat

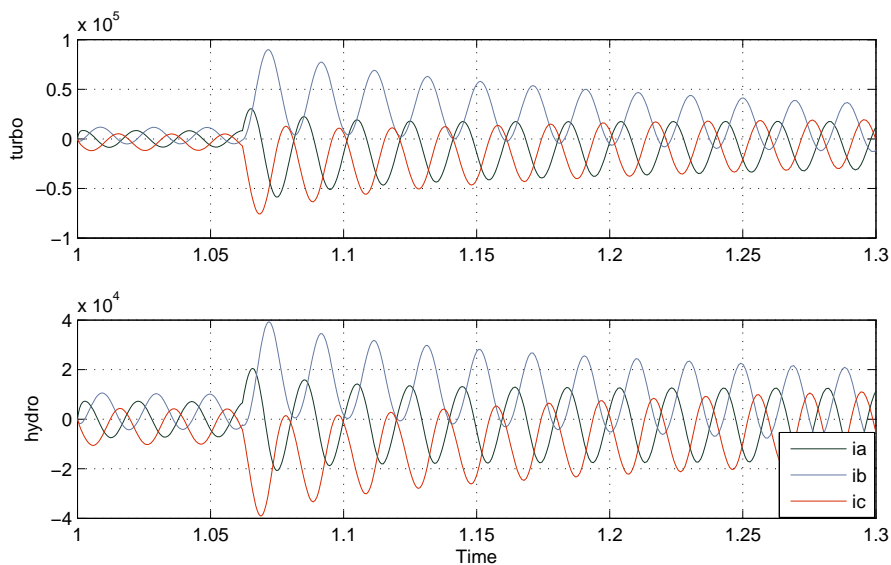
Bez zahrnutí vlivu oblouku

Na následujícím příkladu (obr. 7.2) je zobrazena situace, kdy ke vzniku zkratu došlo v čase 1,06 s. Je zřejmé, že ve fázi C je jak v případě turboalternátoru, tak v případě hydroalternátoru plná asymetrie a proud během první periody neprotíná nulovou hodnotu.



Obr. 7.2: Výsledné průběhy pro plnou asymetrii fáze C

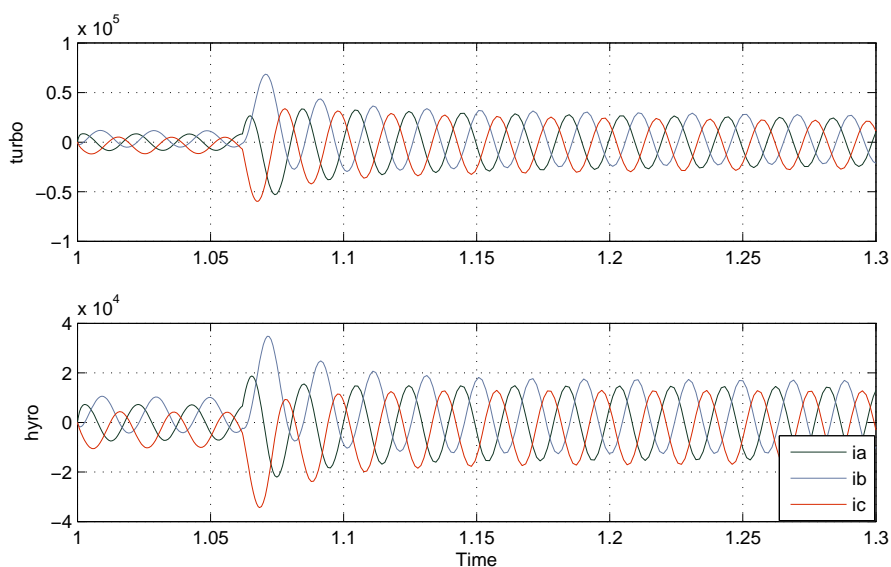
Na obr. 7.3 došlo ke vzniku zkratu o 2 ms později a je vidět, že u obou strojů byla plná asymetrie ve fázi B. Zároveň je možné si všimnout, že průběh ve fázi A je téměř symetrický.



Obr. 7.3: Výsledné průběhy pro plnou asymetrii fáze B

Se zahrnutím vlivu oblouku

Další obrázek 7.4 ilustruje průběh zkratového proudu se zahrnutím odporu poruchy či oblouku – ten byl v tomto případě 50krát větší, než v předchozích dvou simulacích. Veškeré další podmínky jakožto i okamžik vzniku zkratu byly zachovány z předchozí simulace (z obr. 7.3). Je patrné, že činný odpor se projevil tak, že došlo k rychlému utlumení stejnosměrné složky.

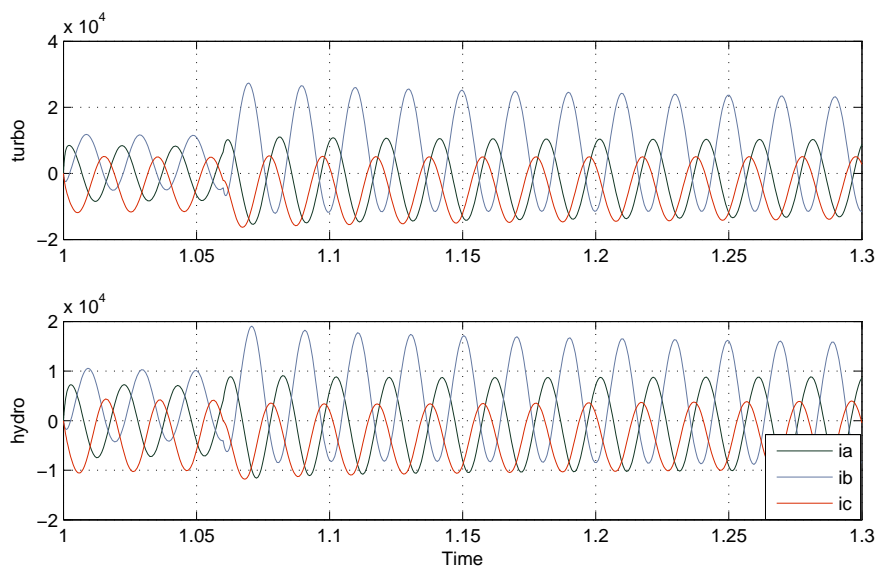


Obr. 7.4: Výsledné průběhy pro plnou asymetrii fáze B se zahrnutím odporu oblouku

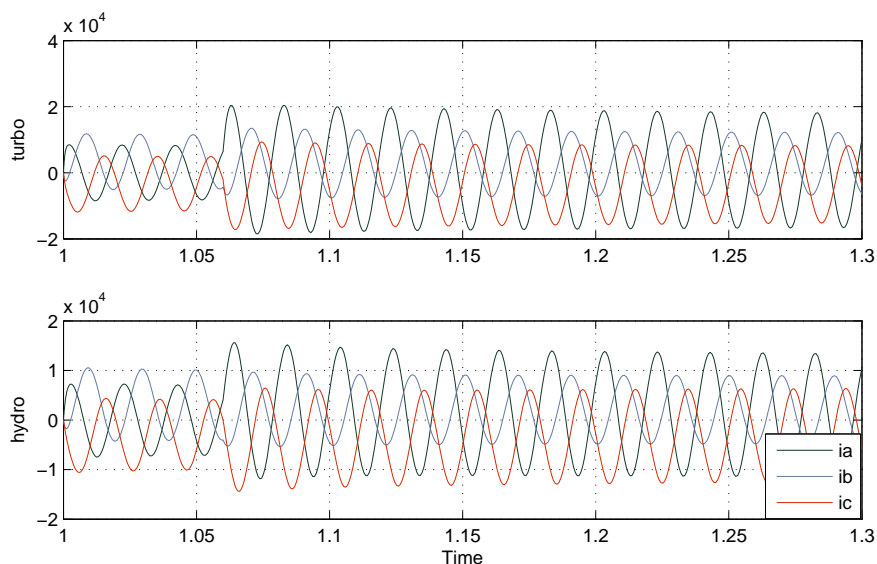
7.2.2 Jednofázový generátorový zkrat

Bez zahrnutí vlivu oblouku

Řešený model je v tomto případě shodný s předchozím, jediný rozdíl je v nastavení bloků *fault_1* a *fault_2* ve schématu B.1. V jejich nastavení byla jedna konkrétní fáze nastavena jako zkratovaná. Následující obrázky zobrazují průběh proudů při zkratu fáze *B* (obr. 7.5), resp. fáze *A* (obr. 7.6). Ke zkratu došlo v okamžiku $1,06\text{ ms}$.



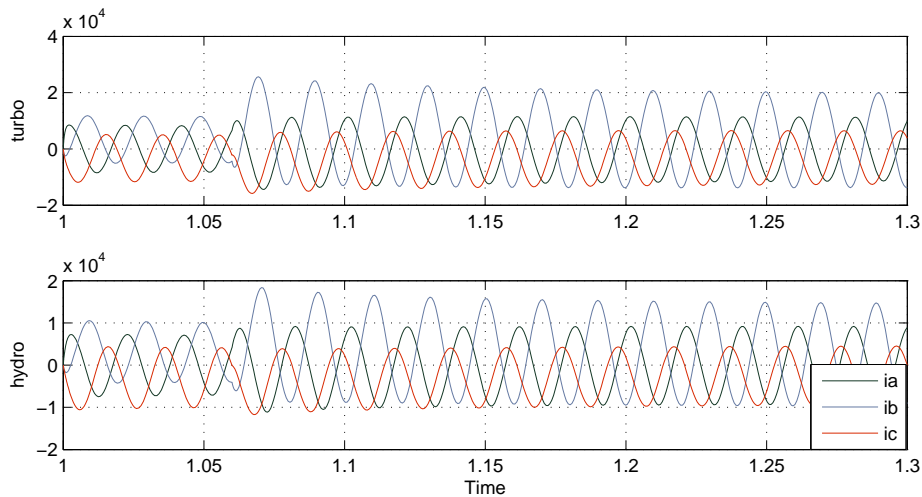
Obr. 7.5: Výsledné průběhy zkratu fáze B bez zahrnutí odporu poruchy



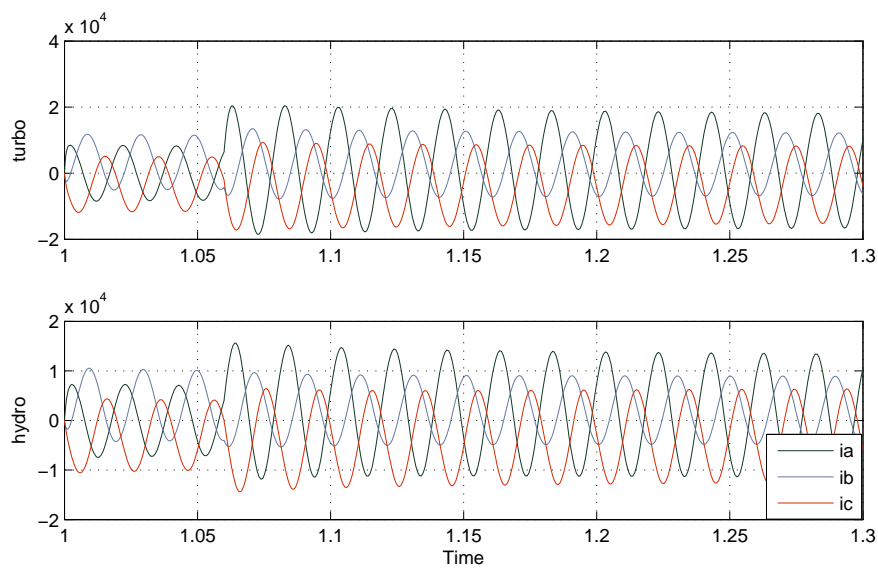
Obr. 7.6: Výsledné průběhy zkratu fáze A bez zahrnutí odporu poruchy

Se zahrnutím vlivu oblouku

Obdobně jako v případě 3f zkratu i zde byl nastaven odpor poruchy na 50krát vyšší hodnotu. Jinak následující obrázky korespondují s předchozím případem – ke vzniku zkratu došlo v čase $1,06\text{ ms}$.



Obr. 7.7: Výsledné průběhy zkratu fáze B se zahrnutím odporu poruchy

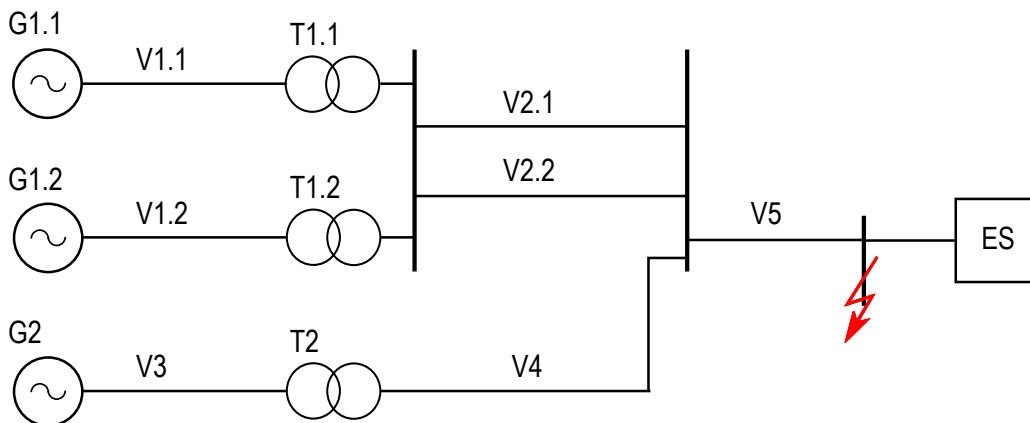


Obr. 7.8: Výsledné průběhy zkratu fáze A se zahrnutím odporu poruchy

7.3 Modelování části soustavy s vypínačem

Na obr. 7.9 je zobrazeno schéma obvodu, na kterém se provede analýza asymetrie zkratových proudů pro vypínače umístěné v síti. Stroje G1.1 a G1.2 jsou turboalternátory, jejichž hodnoty pasivních parametrů souhlasí s předchozí kapitolou. Jejich výkon je vyveden přes zapouzdřené vodiče V1.1 a V1.2 a blokové transformátory T1.1 a T1.2 do blokové rozvodny, ze které vede dvojitě vedení V2.1 a V2.2 do vzdálené rozvodny. Do této rozvodny dále pracuje hydroalternátor G2, přes zapouzdřené vedení V3, blokový transformátor T2 a venkovní vedení V4. K této rozvodně je dále připojen blok reprezentující vnější elektrickou síť 400 kV, reprezentovanou jmenovitým napětím a zkratovým výkonem. Protože modelovaný zkrat vznikne na přípojnicích v rozvodně, do zkratu bude přispívat z jedné strany modelovaný obvod a z druhé strany síť 400 kV. Na níže uvedených obrázcích jsou tak zobrazeny 3 průběhy – proudy tekoucí z modelované soustavy (ve schématu B.2 měřen blokem **X1**), proudy tekoucí ze zjednodušeného bloku sítě (měřeno blokem **X2**) a výsledný zkratový proud (součet obou předchozích, měřeno blokem **X3**).

V modelu je možné najít možnou analogii s reálnou situací např. rozvodny Slavětice, kam pracují 4 bloky z JE Dukovany a 2 bloky z PVE Dalešice. I zde je tudíž možnost výskytu plných asymetrických zkratů zcela reálná.



Obr. 7.9: Schéma řešené sítě

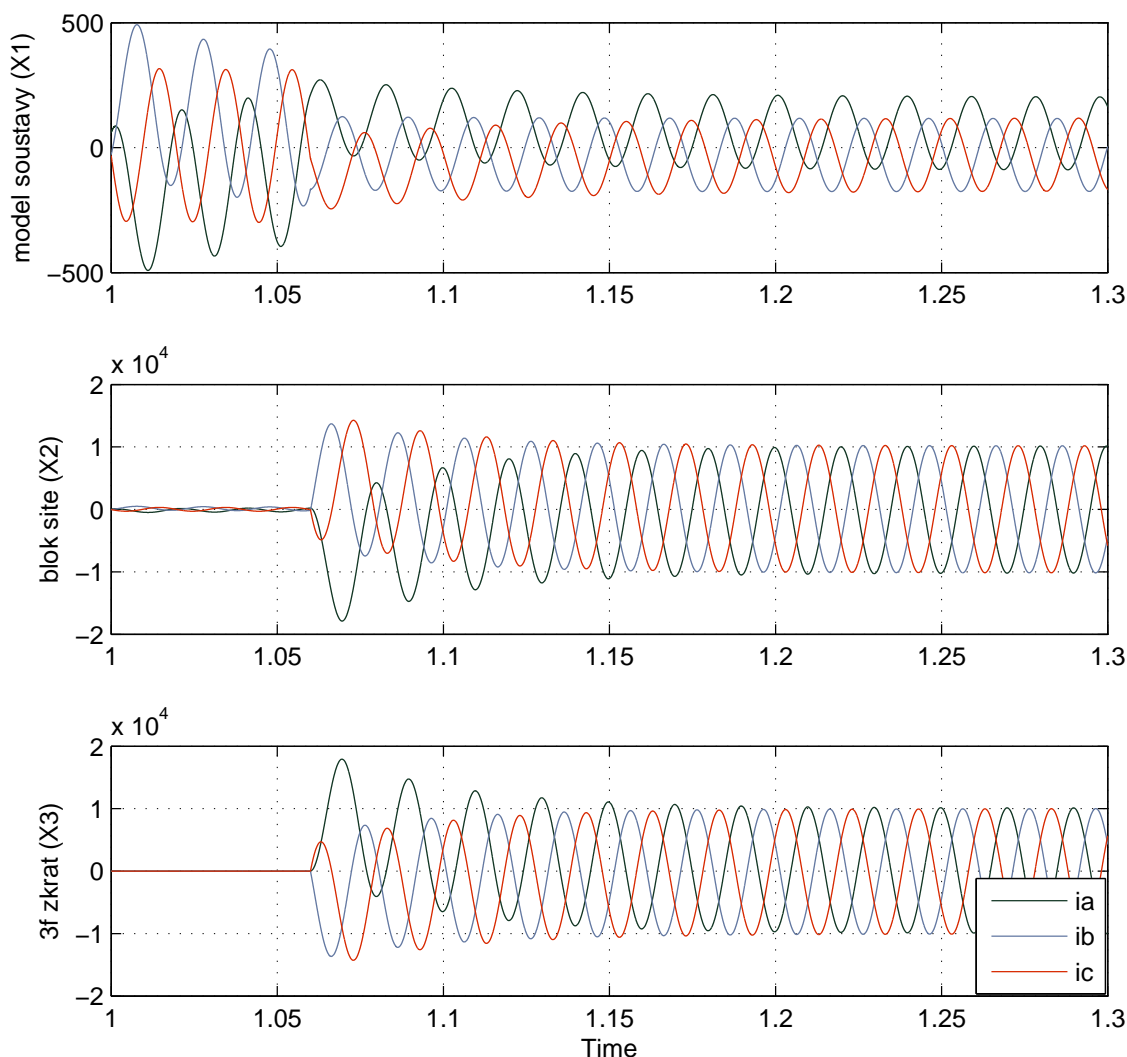
G1 + G2: Alternátory	
Parametry dle tab. 6.1 a 6.2	
V1.1 + V1.2 + V3: IPB (GIS) vodiče	
$R_k = 2,9 \text{ m}\Omega/\text{m}$	$L_k = 0,16 \text{ mH}/\text{m}$
$C_k = 72,08 \text{ pF}/\text{m}$	$l = 140 \text{ m}$
V2.1 + V2.2: Donau AlFe 3x350/6	
$R_k = 0,0283 \Omega/\text{km}$	$X_k = 0,2948 \Omega/\text{km}$
$l = 40 \text{ km}$	
V4: Portál AlFe 3x350/6	
$R_k = 0,0283 \Omega/\text{km}$	$X_k = 0,3153 \Omega/\text{km}$
$l = 60 \text{ km}$	
V5: Portál AlFe 3x450/6	
$R_k = 0,0217 \Omega/\text{km}$	$X_k = 0,3074 \Omega/\text{km}$
$l = 80 \text{ km}$	
T1.1 + T1.2 + T2: Yd1 400/13,8 kV 160 MVA	
$u_k = 8 \%$	$i_0 = 0,1 \%$
$\Delta P_k = 0,4 \%$	$\Delta P_0 = 0,15 \%$
$r_k = 0,004 \text{ p.u.}$	$g_{Fe} = 0,0015 \text{ p.u.}$
$x_\sigma = 0,079 \text{ p.u.}$	$b_\mu = 0,0098 \text{ p.u.}$
$r_{Fe} = 666,6 \text{ p.u.}$	$x_\mu = 102 \text{ p.u.}$
V4: Soustava 400 kV	
$U_n = 400 \text{ kV}$	$S_{ks} = 5 \text{ GVA}$

Tab. 7.1: Parametry sítě

7.3.1 Třífázový zkrat na přípojnicích

Bez zahrnutí vlivu oblouku

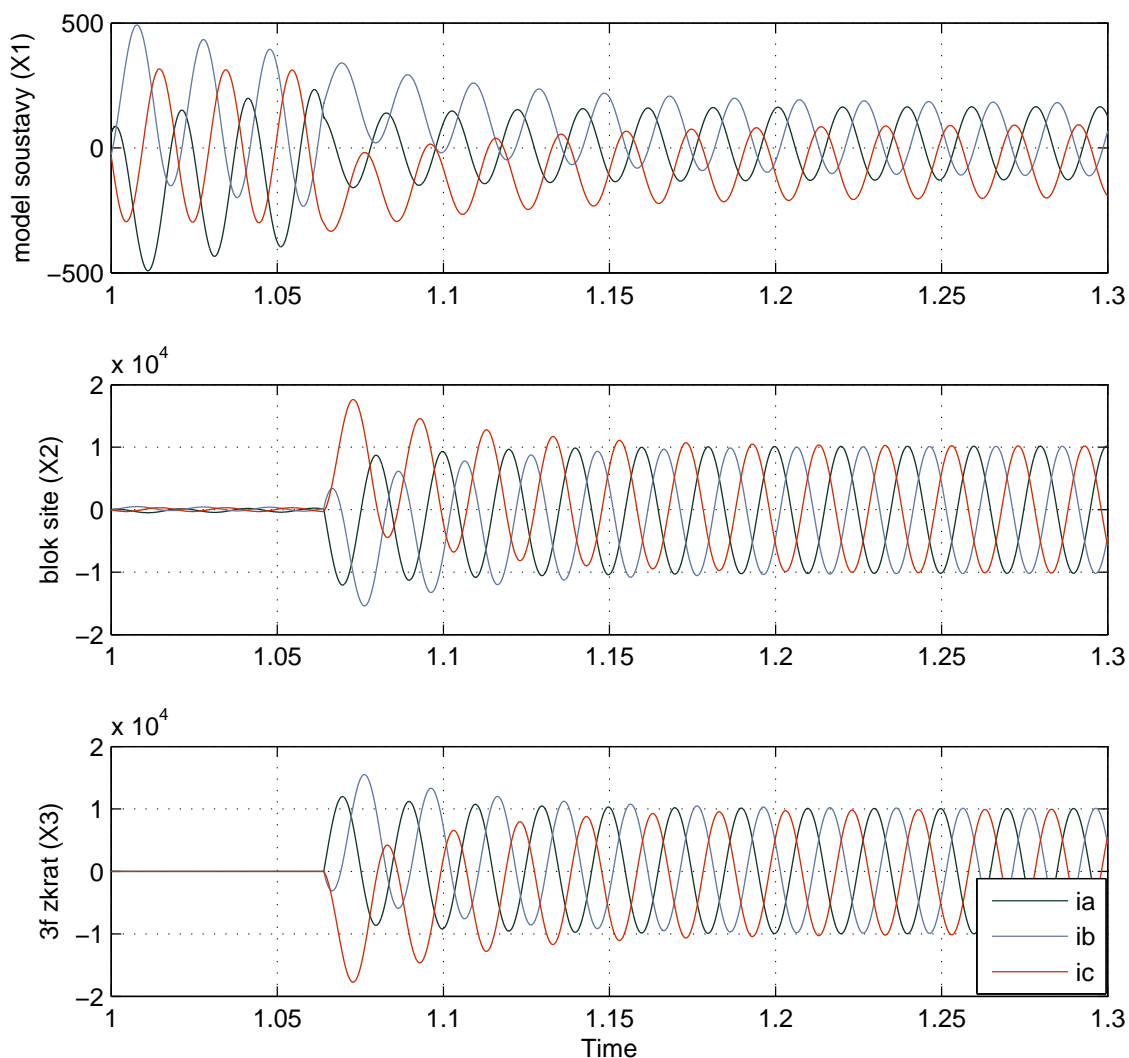
Princip modelování a získání průběhů je shodný jako při modelování generátorového zkratu. Na níže uvedeném obrázku jsou průběhy proudů při třífázovém zkratu na přípojnicích, který vznikl v čase 1,06 s.



Obr. 7.10: Průběhy proudů při 3f zkratu v čase $t = 1,06$ s

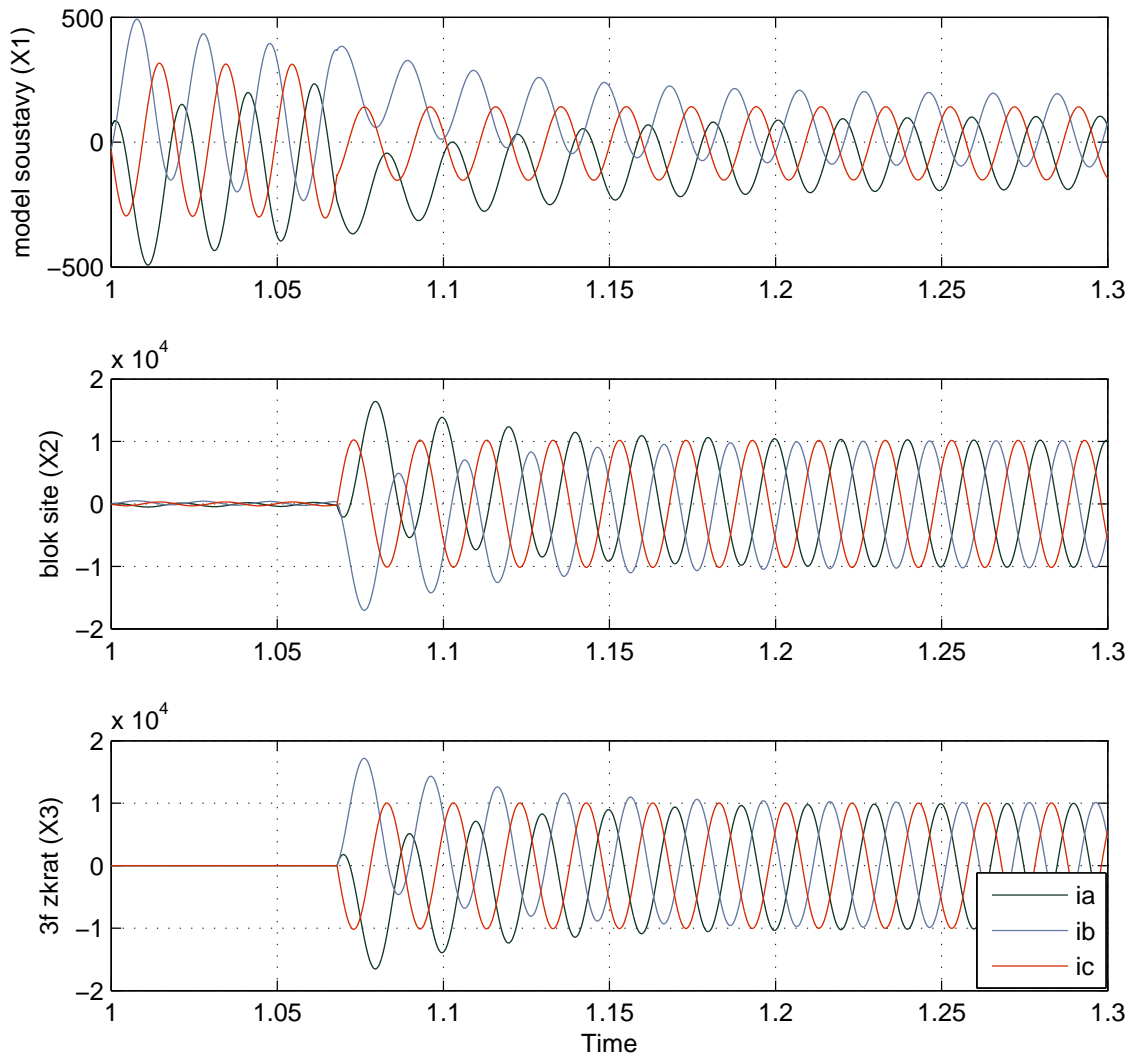
Z obrázku je zřetelné, že do zkratu bude přispívat zejména zjednodušený blok znázorňující elektrickou síť 400 kV (na schématu 7.9 napravo od zkratu). To je způsobeno vzájemnými poměry impedancí – impedance tohoto bloku je mnohem nižší než celá část soustavy nalevo od zkratu.

Na následujícím obrázku je případ, kdy ke zkratu došlo o 4 ms později. Fáze B a C byly v okamžiku vzniku zkratu blíže ke své amplitudě a tak se projevila větší stejnosměrná složka proudu tekoucího z levé strany soustavy.



Obr. 7.11: Průběhy proudů při 3f zkratu v čase $t = 1,064\text{ s}$

Na následujícím obrázku došlo ke zkratu o další 4 ms později, tedy v čase $t = 1,068$ s. Je vidět, že proudy tekoucí z levé části schématu mají ve fázích A a B plnou asymetrii a k prvnímu protnutí časové osy dojde až v průběhu třetí periody. Proud ve fázi C má téměř symetrický průběh.

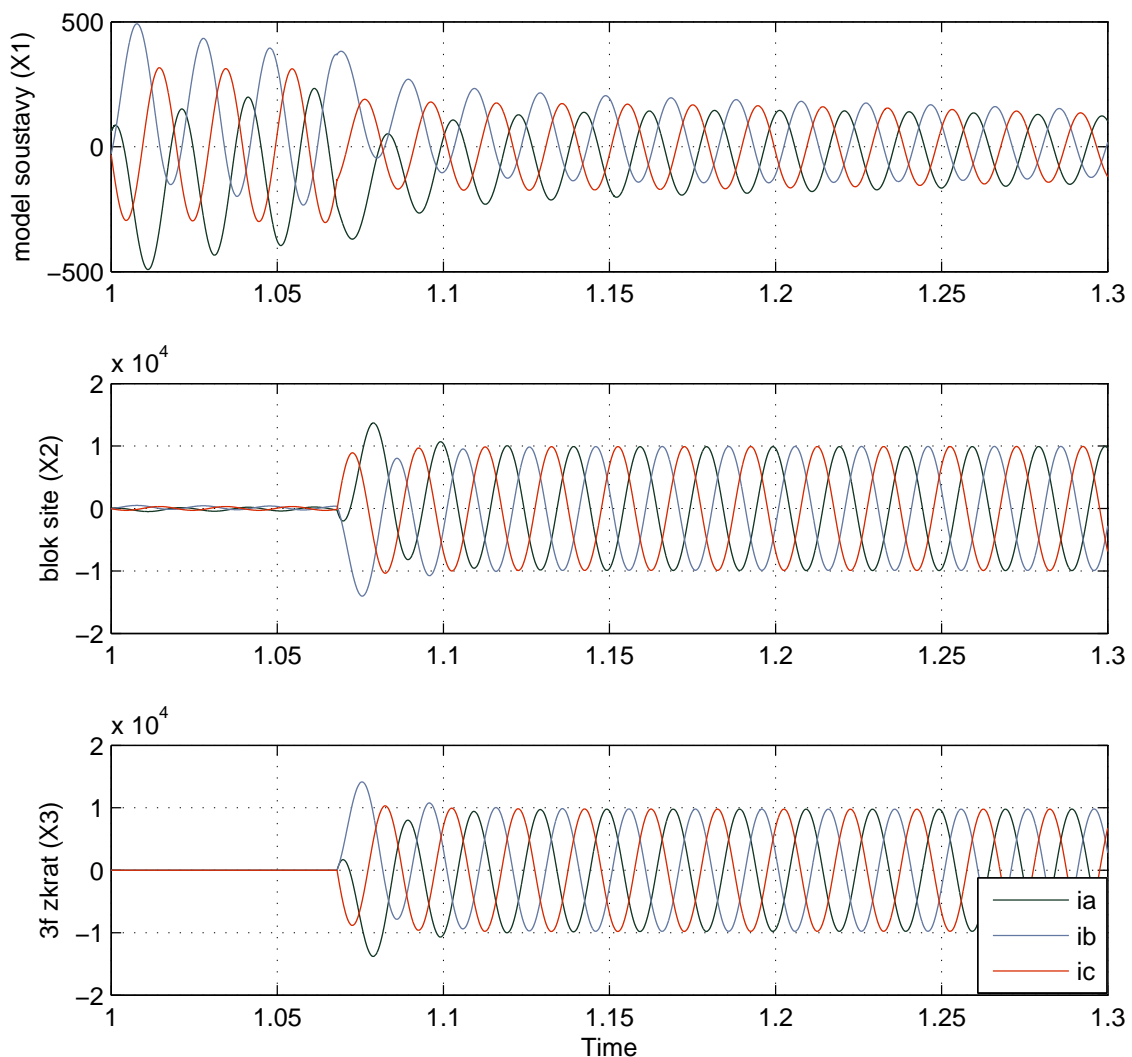


Obr. 7.12: Průběhy proudů při 3f zkratu v čase $t = 1,068$ s

Dále stojí za zmínění ten fakt, že výsledný zkratový proud ($X3$) je ve všech třech případech rozdílný, ale pro žádnou fázi nikdy není dosaženo plné asymetrie. K tomuto by došlo, pokud by pravý blok externí sítě 400 kV měl nulový činný odpor a ke zkratu by došlo v maximální hodnotě proudu. Protože jak celý zkratový obvod tak i náhradní blok sítě mají vždy nenulový činný odpor, výsledný zkratový proud tak nikdy nebude mít plnou asymetrii.

Se zahrnutím vlivu oblouku

Vliv odporu poruchy je naznačen jen v jednom případě na následujícím obrázku. Jak již bylo zmíněno, hlavní složkou zkratového proudu je proud tekoucí z vnější sítě, na těchto dvou se tedy odpor poruchy projeví nejvíce, přičemž proud z modelované soustavy zůstane téměř nezměněn. Odpor poruchy byl nastaven na $5\ \Omega$ a její vliv je zřejmý např. na průběhu proudu ve fázi *B*. V předchozím případě s nulovým odporem poruchy byla amplituda $17,15\ \text{kA}$ a hodnota amplitudy v záporné půlperiodě $-4,6\ \text{kA}$. V tomto případě má kladná amplituda hodnotu $14,16\ \text{kA}$ a v záporné půlperiodě $-7,6\ \text{kA}$. Vliv odporu na utlumení stejnosměrné složky je tedy patrný.



Obr. 7.13: Průběhy proudů při 3f zkratu v čase $t = 1,068\ \text{s}$ se zahrnutím odporu oblouku

Další případy (další časy) již uvedeny nejsou, protože vliv poruchy je zřejmý a souhlasný s případy modelování generátorového zkratu.

7.3.2 Jednofázový zkrat na přípojnicích

Protože vliv odporu poruchy je v předchozích případech prokazatelný a zřejmý, jednofázový zkrat už bude modelován jen s ideálně nulovým odporem poruchy, zato však pro různé fáze či okamžiky vzniku zkratu.

Metodika modelování je opět shodná s předchozím schématem, ke změně došlo jen v nastavení bloků *fault* a *fault time*, ve kterých se nastavil požadovaný čas, respektive zkratovaná fáze.

Simulaci jsem provedl pro několik okamžiků vzniku zkratu v rozmezí 10 ms , což zajišťuje vznik zkratu v průběhu celé půlperrody proudu vždy pro jednu zkratovanou fázi. V následující tabulce jsou uvedeny nejdůležitější výsledky ze simulací a to hodnota dynamického zkratového proudu postižené fáze, maximální hodnoty proudu v nepostižených fázích a časový interval mezi jednotlivými průchody proudu nulou zkratového proudu.

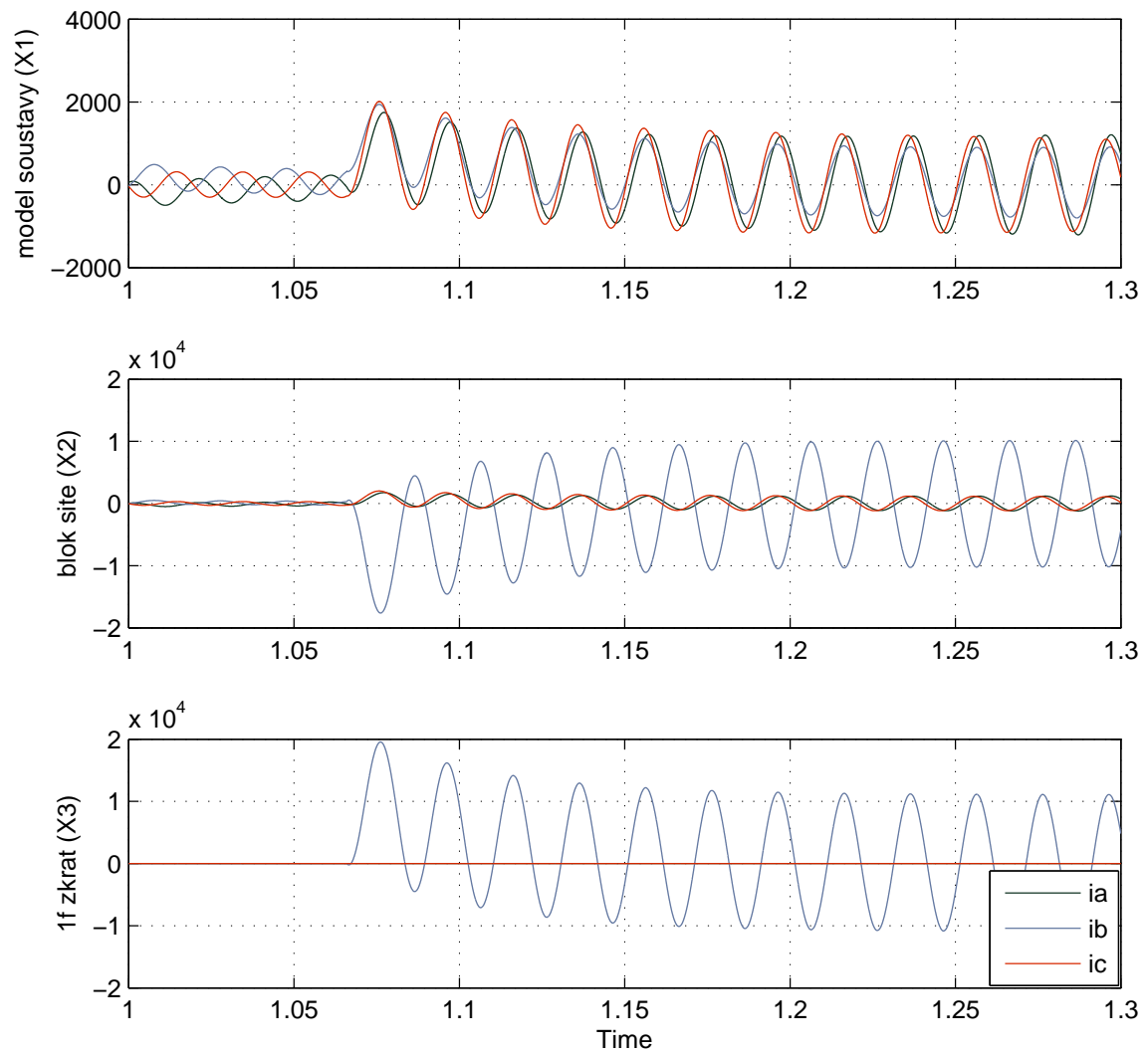
Zkratovaná fáze		Okamžik vzniku zkratu						[s]
		1,06	1,062	1,064	1,066	1,068	1,07	
A	i_{Amax}	20,1	17,8	13,1	-14,2	-18,2	-20	[kA]
	$i_{B,Cmax}$	1,9	1,8	1,3	-1,2	-1,4	-1,8	[kA]
	Δt_0	16,9	14,4	11,2	11,9	14,7	16,9	[ms]
B	i_{Bmax}	-15	12,6	17	19,7	18,8	15	[kA]
	$i_{A,Cmax}$	-1,5	1,2	1,6	1,8	1,7	1,4	[kA]
	Δt_0	12,4	10,8	13,8	17,6	15,4	12,3	[ms]
C	i_{Bmax}	15,7	-19	-19,5	-16,6	-11	15,7	[kA]
	$i_{A,Bmax}$	-1,5	-1,7	-1,8	-1,6	-1,2	1,5	[kA]
	Δt_0	12,8	15,6	16,2	13,4	10,8	12,9	[ms]

Tab. 7.2: Srovnání výsledků pro 1f zkrat na přípojnicích

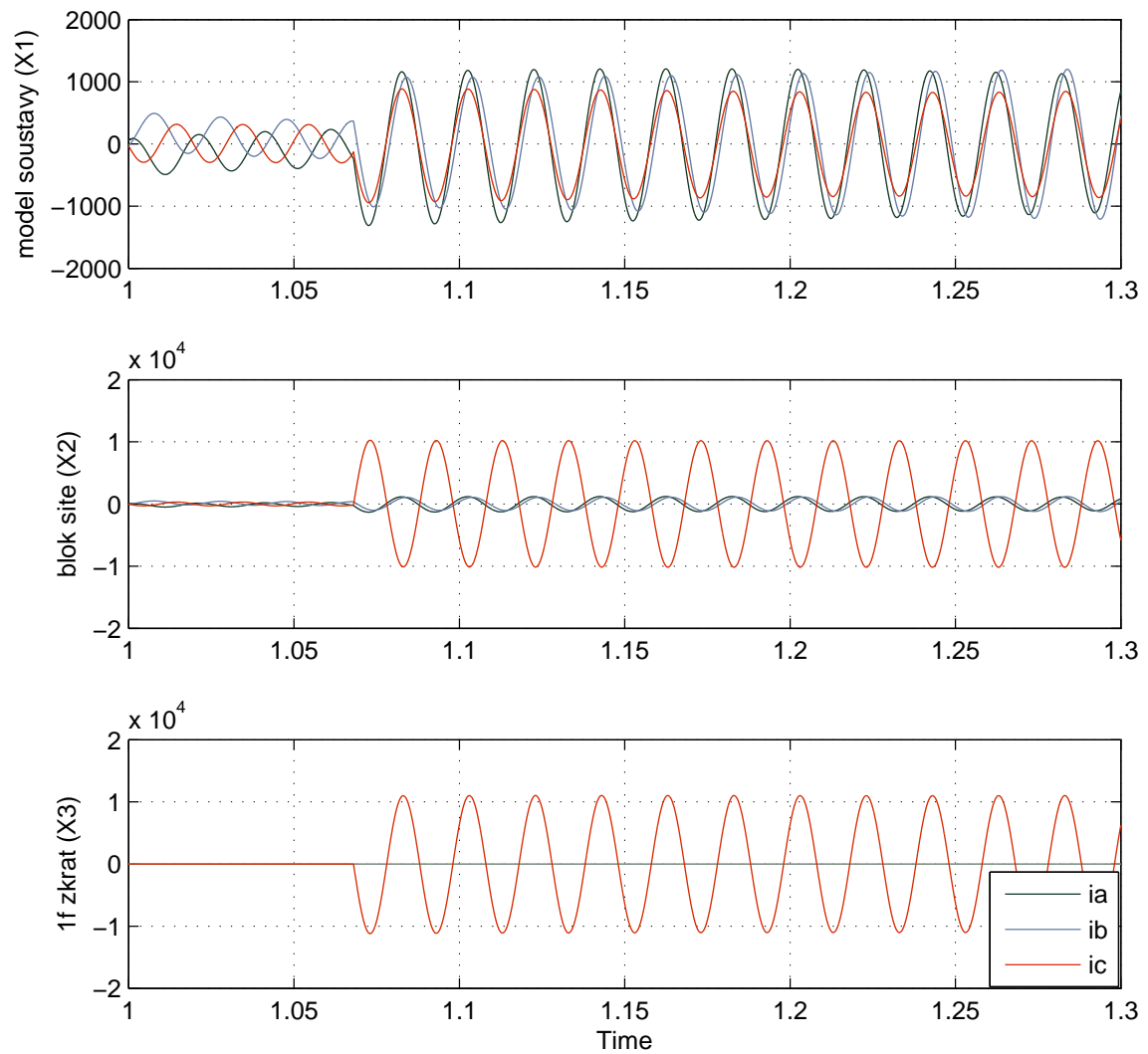
V uvedené tabulce jsou zeleně zvýrazněny případy, kde měl daný zkratový proud symetrický průběh, naopak červeně podbarvené jsou ty průběhy, které měli nejznatelnější stejnosměrnou složku. Tento fakt ještě podtrhuje interval mezi jednotlivými průchody proudu nulou, jejichž hodnota sahala až k 17 ms .

Na následujících obrázcích jsou uvedeny pro názornost jen dva případy – prvním obrázkem je průběh s největší asymetrií (dle tabulky fáze *B* v okamžiku $1,066\text{ s}$) a druhým je symetrický průběh při zkratu fáze *C* v okamžiku $1,068\text{ s}$.

Ze získaných průběhů je možné diskutovat několik skutečností – největší příspěvek zkratovému proudu bude dodávat blok vnější síť napravo od zkratu, ale i příspěvek z modelované soustavy bude mnohem větší, než když přispíval do třífázového zkratu. Zároveň je možné si všimnout velké proudové nesymetrie (vzhledem k nulovému bodu soustavy). Jednofázový zkrat totiž tvoří nesymetrický příčný článek, k jehož analytickému řešení by se využilo metody Fortescue.



Obr. 7.14: Průběhy proudů při 1f zkratu fáze B v čase $t = 1,066$ s



Obr. 7.15: Průběhy proudů při 1f zkratu fáze C v čase $t = 1,068$ s

8

Závěr

Spolehlivost vypínačů vvn/zvn je obecně velice rozsáhlé téma a to jak z teoretického, tak z praktického hlediska. V úvodní části práce jsou naznačeny základní poznatky o spolehlivosti vysokonapěťových zařízení a spolehlivostních kritériích a jsou vyhodnoceny závěry z provozních průzkumů vypínačů. Je tak možné usoudit, že spolehlivost vypínačů je v současné době na vysoké úrovni, ale pro udržení této situace je nutné neustále přezkoumávat celé spektrum parametrů vypínaných proudů a zkratových obvodů.

Časová závislost vypínací schopnosti je vázána k principu zhášení spínacího oblouku a v současné době je na velmi kvalitní úrovni. Je nutné však pamatovat, že v oblasti vypínaných obvodů dochází ke znatelnému vývoji a posunu vypínaných parametrů až za limitní oblasti vypínacích charakteristik.

Z teoretického modelu je patrné, že pravděpodobnost výskytu plných asymetrických proudů je vyšší pro turboalternátory. Pro generátorové vypínače pracující u rychloběžných strojů je tak nutné důsledně navrhnout a optimalizovat dobu proudění a množství plynu a co nejvíce zamezit možnosti vzniku generátorových zkratů. Teoretický model je vynikající platformou pro naznačení možných problémů a srovnání turboalternátorů a hydroalternátorů.

V provedených simulacích byl teoretický model ověřen a jeho možné nedostatky potvrzeny. Provedené simulace a jejich výsledky potvrdily přijaté předpoklady. Spínací oblouk znatelně utlumí stejnosměrnou složku a asymetrie zkratových proudů je nutné zkoumat ve všech třech fázích. Model vypínače instalovaného v síti potvrdil, že výskyt plně asymetrických proudů je pravděpodobnější u generátorových vypínačů. To však nevylučuje možnost plně asymetrického zkratu v soustavě.

Průběhy zkratových proudů jasně definují požadavky na jejich vypínání a je tak nutné při návrhu energetického celku prozkoumat možné odchylky od již zavedených postupů.

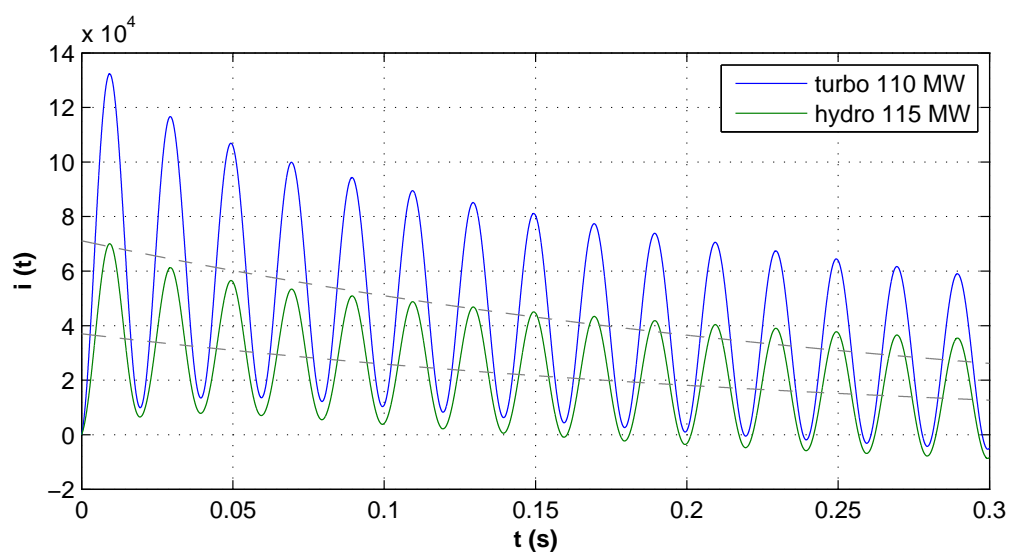
Literatura

- [1] BÁRTA, K., VOSTRACKÝ, Z. a kol. *Spínací přístroje velmi vysokého napětí*. Praha: SNTL/ALFA, 1983.
- [2] TŮMA, J., RUSEK, S., MARTÍNEK, Z., CHEMIŠINEC, I., GOŇO, R. *Spolehlivost v elektroenergetice.*, Praha: Conte, 2009. ISBN 80-239-6483-6.
- [3] MAKAREINIS, D., SÖLVER, C. E., HYRCZAK, A., MESTROVIC, K. *Intermediate results of reliability of HVCB*. Cigre WG 13.06 Tutorial, Seoul, 2008.
- [4] HEISING, C. R. *Worldwide Reliability Surveys of High Voltage Circuit Breakers*. IEEE Power Engineering Review, Paříž, 1995.
- [5] JANSSEN, A. L. J., HEISING, C. R., LANZ, W., SANCHIS, G. *Mechanical endurance, reliability compliance and environmental testing of HVCB*. Cigre Review, Paříž, 1996
- [6] RUSŇÁK, Š., ŘEZÁČEK, P. *Elektrické přístroje 1*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2001. ISBN 80-7082-825-0.
- [7] TESAŘOVÁ, M., ŠTROBLOVÁ, M. *Průmyslová elektroenergetika*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2000. ISBN 80-7082-703-3.
- [8] TROJÁNEK, Z., HÁJEK, J., KVASNICA, P. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. Praha: SNTL/ALFA, 1987.
- [9] HÁJEK, J. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. Plzeň: Ediční středisko VŠSE, 1983.
- [10] JEŽEK, V. *Analýza vypínacího procesu generátorového vypínače*. Doktorská disertační práce, ZČU v Plzni, 2011
- [11] SEDLÁČEK, J. *Stacionární a dynamické napěťové namáhání vypínačů vn a vvn*. Doktorská disertační práce, ZČU v Plzni, 1999
- [12] VOSTRACKÝ, Z. *Charakteristiky vypínací schopnosti vypínačů a jejich užití v praxi*. Doktorská disertační práce, ČVUT Praha, FEL - Škoda, Plzeň, 1986
- [13] HAVELKA, O., a kol. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL/ALFA, 1985
- [14] *Výkonové vypínače vn a vvn - studijní materiály*. SPŠSaE a VOŠ Liberec [Cit. 27. 10. 2013]. Dostupné z: http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/.../vzduch_vyp.pdf

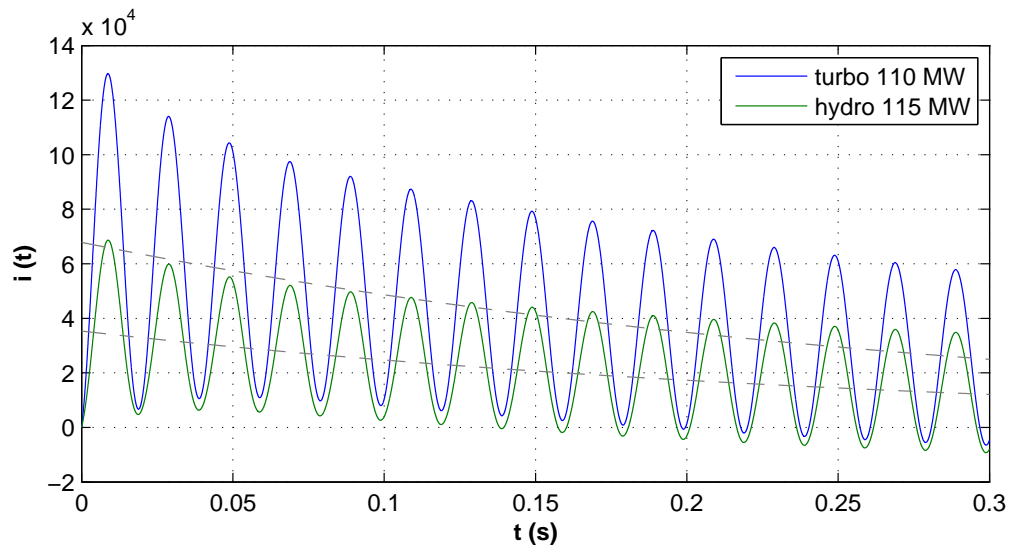
- [15] MEDVEĎ, D., HVIZDOŠ, M. *Modelovanie v prostredí EMTP – ATP*. Košice: TU v Košiciach, 2011. ISBN 978-80-553-0776-3
- [16] AZZAHIMI, M. *IEC medium voltage vacuum circuit breakers 12 kV, 17,5 kV and 24 kV*. Presentace firmy Eaton [Cit. 15.12.2013]. Dostupné z: <http://www.eaton.com/ecm/groups/public/@eaton/documents/content/pct226764.pdf>
- [17] VOSTRACKÝ, Z. *Přednášky k předmětu KEE/EPR2*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2013.
- [18] SMEETS R.P.P, BARTS H.D., ZEHNER L. *Extreme stresses on generator circuit breakers*. CIGRE Report A3-306, 2006.
- [19] BRAUN, D., CAVALIERE, G., DAHINDEN, K., LAKNER, M. *Heat Pipes Cool Generator Circuit-breakers*. Článek z magazínu VGB PowerTech, č. 6/2009.

Příloha A

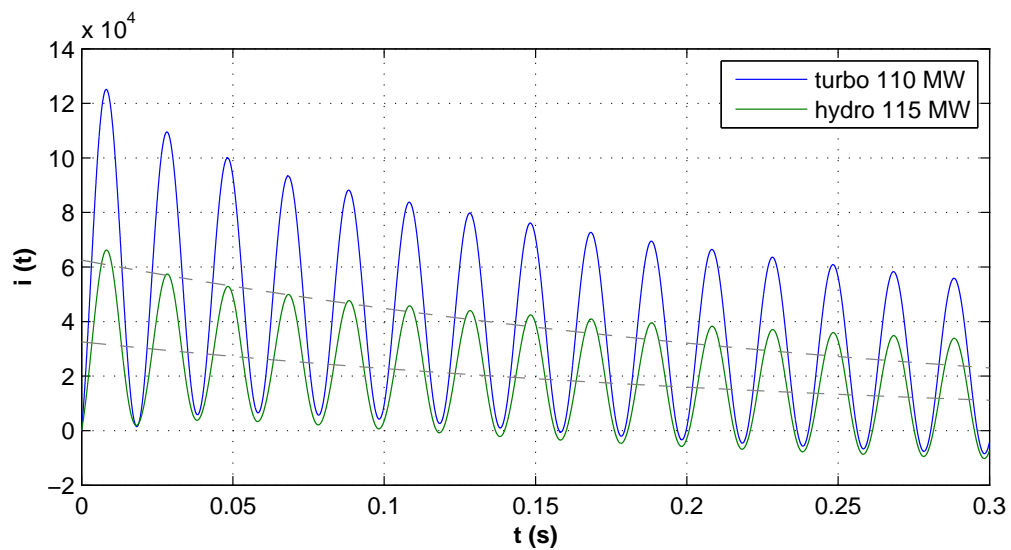
Průběhy zkratových proudů (kap. 6)



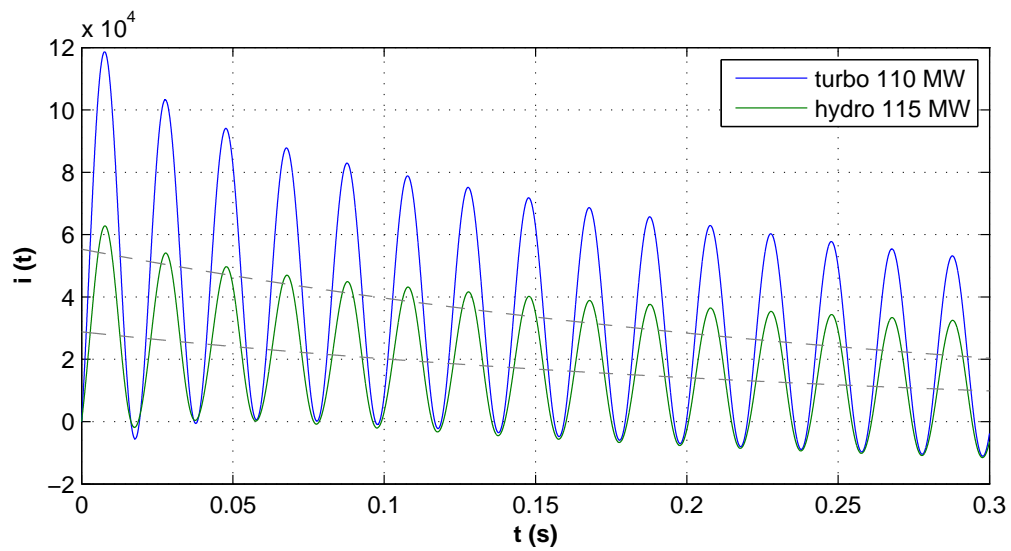
Obr. A.1: Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 10^\circ$



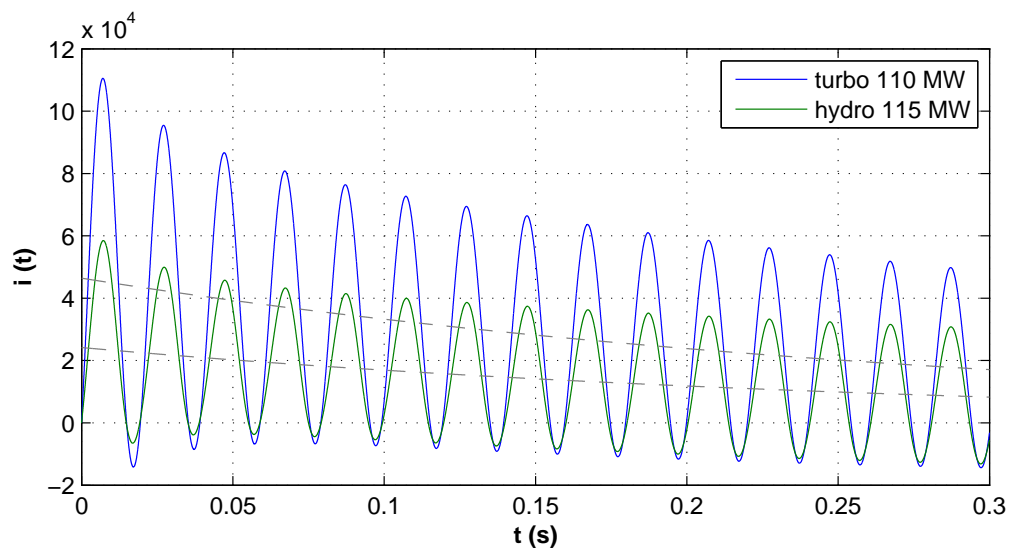
Obr. A.2: Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 20^\circ$



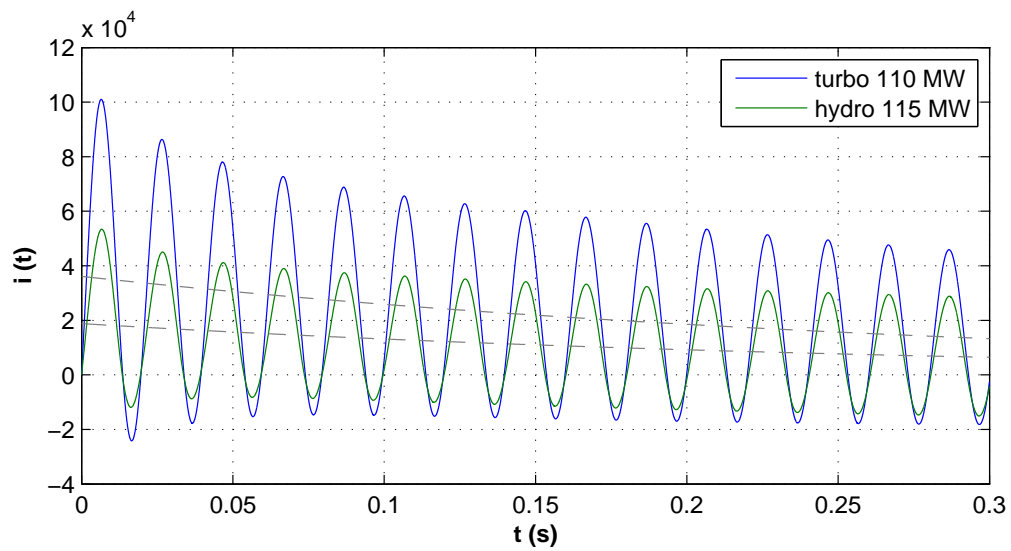
Obr. A.3: Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 30^\circ$



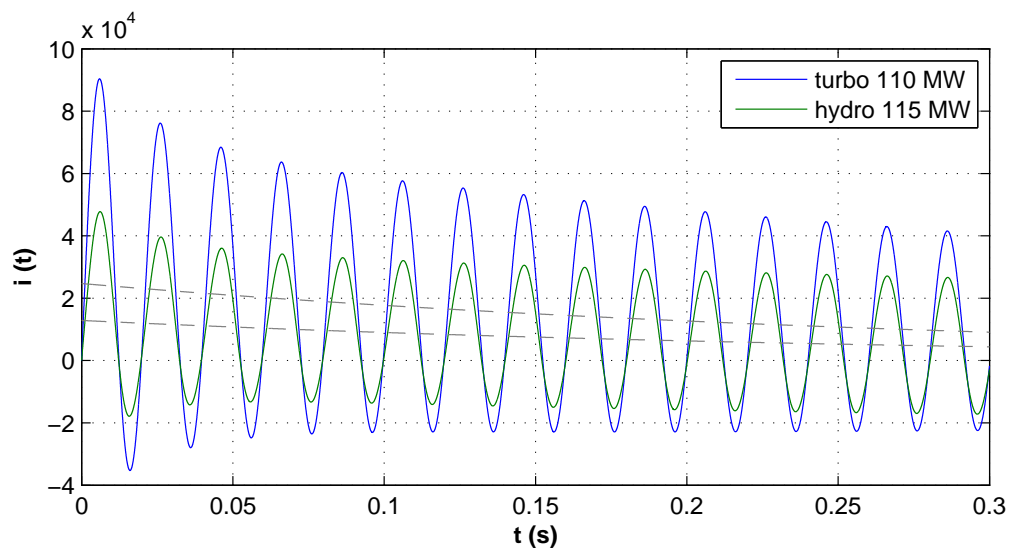
Obr. A.4: Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 40^\circ$



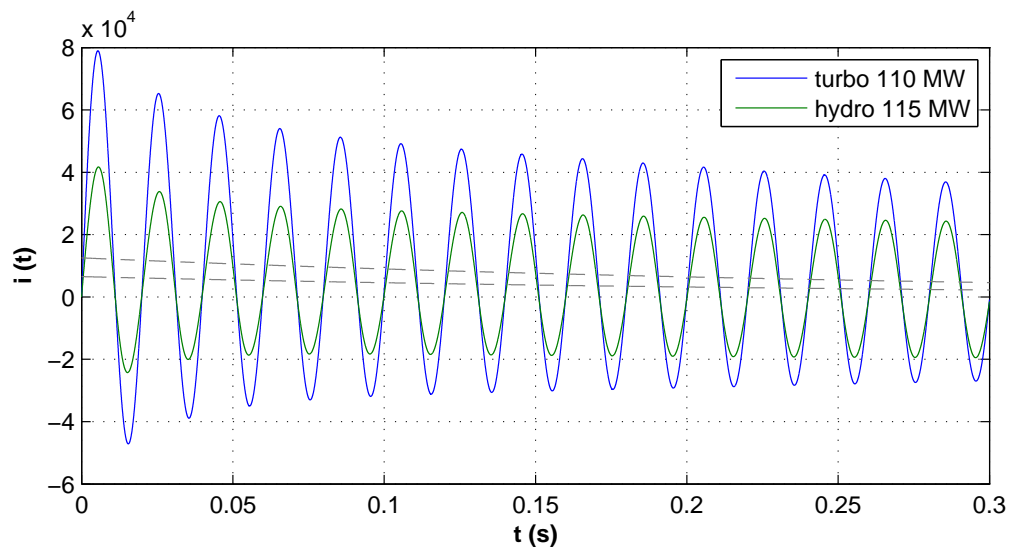
Obr. A.5: Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 50^\circ$



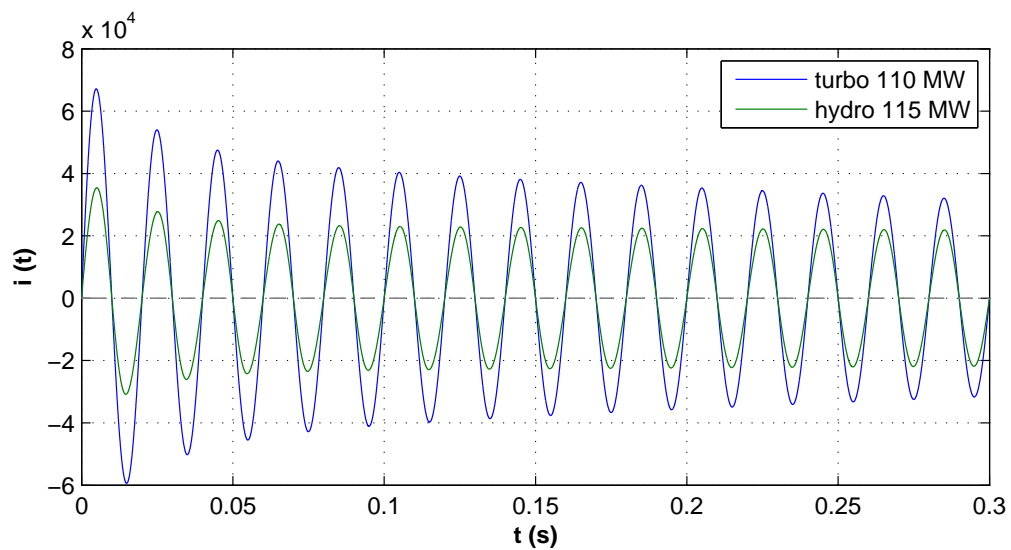
Obr. A.6: Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 60^\circ$



Obr. A.7: Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 70^\circ$



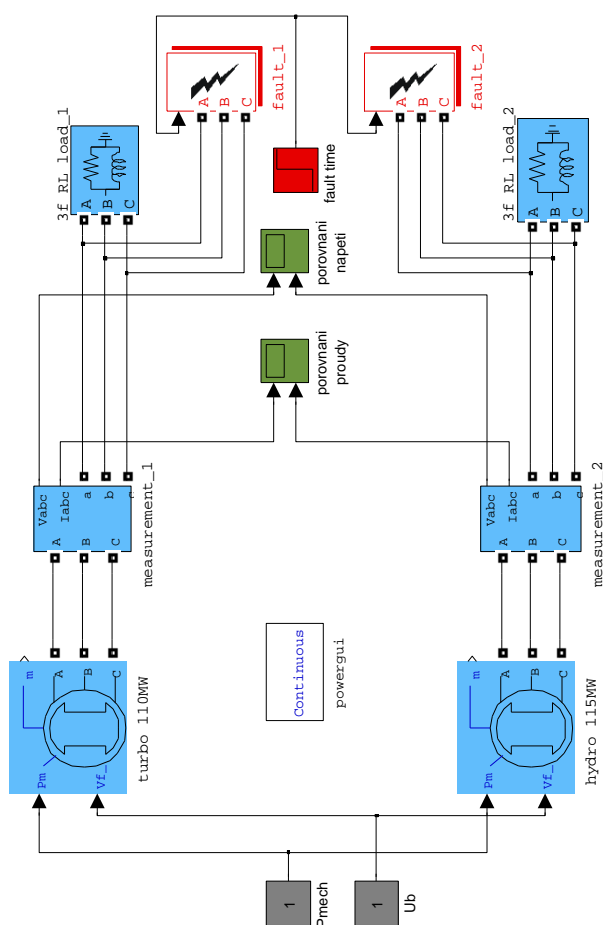
Obr. A.8: Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 80^\circ$



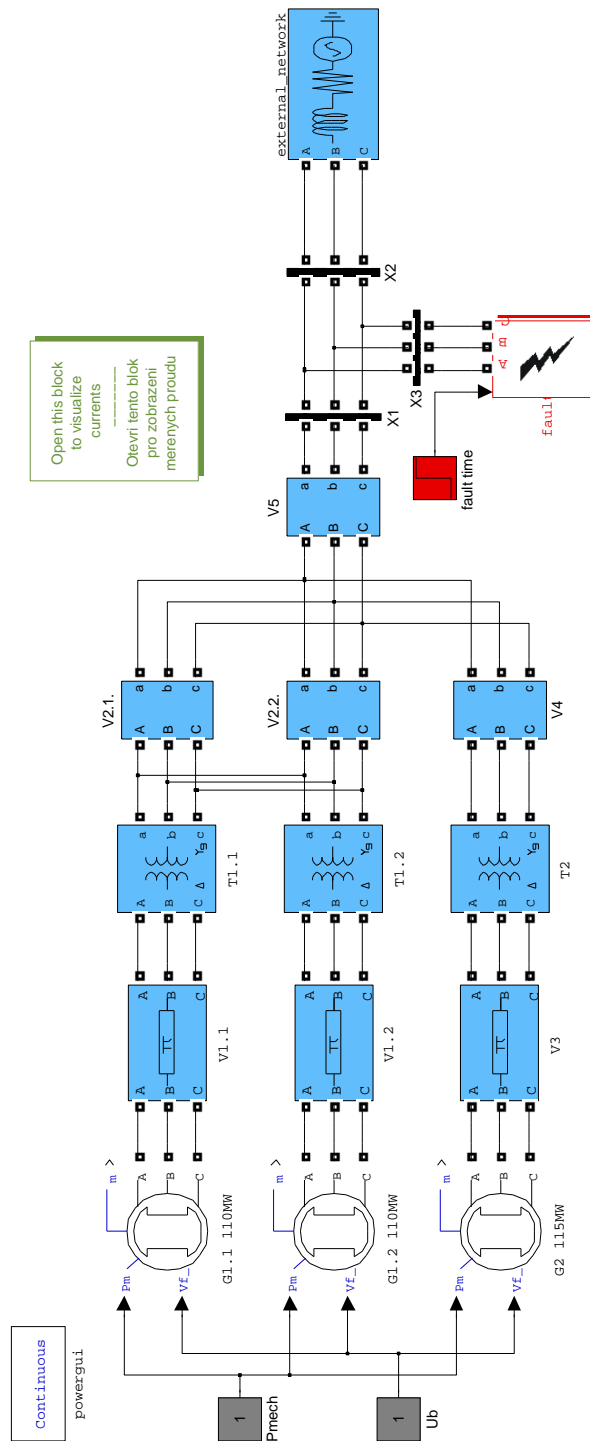
Obr. A.9: Výslednice zkr. proudů turbo- i hydroalternátoru $\alpha_0 = 90^\circ$

Příloha B

Schéματα modelů



Obr. B.1: Schéma modelu pro simulaci generátorového zkratu



Obr. B.2: Schéma modelu pro simulaci části soustavy s vypínačem