

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Analýza a simulace přepět'ových ochran v elektrizační
soustavě**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek PANUŠKA**
Osobní číslo: **E13B0284P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Analýza a simulace přepětových ochran v elektrizační soustavě**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Analyzujte a teoreticky popište problematiku vzniku přepětí v elektrizační soustavě se zaměřením na atmosférická a spínací přepětí.
2. Popište druhy používaných přepětových ochran dle hrubosti a jejich použitelnosti v sítích nn až zvn.
3. Vytvořte počítačový model a simulaci vybrané ochrany proti přepětí.
4. Provedený model vyhodnoťte a stanovte možnosti navazující práce.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladimír Vajnar

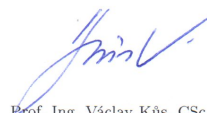
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předmětem této bakalářské práce je popsání vzniku atmosférických a spínacích přepětí v energetických sítích, od nízkého napětí až po zvlášť vysoké napětí, a jeho působení. Snahou bude vytvořit přehledný popis jednotlivých druhů ochran pro dané napětěvé hladiny, které omezí dané přepětí. Práce se dále zabývá stručným popisem principů jejich činnosti a použitelností v sítích nízkého napětí až zvlášť vysokého napětí. V poslední části práce bude řešena názorná simulace přepětěvé ochrany na 1f vedení a její optimalizace v programu Matlab-Simulink.

Klíčová slova

Jiskřiště, přepětí, bleskojistka, omezovač přepětí, varistor, zemní lano, blesk, napětěvý impuls, proudový impuls

Abstract

The subject of this bachelor thesis is an atmospheric and switching overvoltage description in an electric power system from low voltage to particularly high voltage and its influence on this system. I put my efforts into a creation of the synoptic description of the individual kinds of protection against specific levels of voltage, which limit the mentioned overvoltage. The thesis deals with a brief description of principals and their functions and use in a range of all voltage systems. In the last part I will resolve an overvoltage arrester simulation for one phase system and I will optimize the simulation in Matlab-Simulink.

Key words

Spark, overvoltage, lifting arrester, surge arrester, varistor, grand rope, flash, voltage pulse, current pulse

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

.....

podpis

V Plzni dne 1.6.2016

Marek Panuška

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Vladimíru Vajnarovi, za jeho odborné rady, informace a konzultace pro vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat celé své rodině a přátelům za podporu ve studiu.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 PŘEPĚTÍ V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ	13
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY	13
1.2 ROZDĚLENÍ PŘEPĚTÍ	14
1.3 VZNIK PŘEPĚTÍ	15
1.4 ATMOSFÉRICKÉ PŘEPĚTÍ.....	15
1.4.1 Blesk	16
1.4.2 Přímý úder blesku.....	19
1.4.3 Nepřímý úder blesku.....	21
1.4.4 Průběh a parametry blesku.....	22
1.4.5 Ochrana před bleskem.....	24
1.5 SPÍNACÍ PŘEPĚTÍ.....	25
1.5.1 Vypínání kapacitních proudů.....	25
1.5.2 Vypínání malých indukčních proudů	25
1.5.3 Vypínání zkratů.....	26
1.6 DOČASNÁ PŘEPĚTÍ.....	26
1.6.1 Zemní spojení v třífázových soustavách.....	26
1.6.2 Zapínání nebo opětovné zapínání nezatížených vedení	27
2 PŘEPĚŤOVÉ OCHRANY PRO NAPĚŤOVOU SÍŤ NN	27
2.1 VNĚJŠÍ PŘEPĚŤOVÁ OCHRANA	28
2.1.1 Jímací zařízení.....	28
2.1.2 Svod	29
2.1.3 Uzemnění	30
2.2 VNITŘNÍ PŘEPĚŤOVÉ OCHRANY	30
2.2.1 Zóny ochrany před bleskem - LPZ.....	30
2.2.2 Stupně ochrany	31
2.2.3 Jiskřiště.....	32
2.2.4 Varistor.....	33
2.2.5 Supresorová dioda.....	36
2.2.6 Zenerova dioda.....	36
2.2.7 Transil	37
2.2.8 Trisil	37
2.2.9 Porovnání přepětových ochran používaných pro nn.....	38
2.3 KOORDINACE ČINNOSTI PŘEPĚŤOVÝCH OCHRAN	38

3	PRVKY OCHRANY PROTI PŘEPĚTÍ NA SÍTI VN, VVN, ZVN	39
3.1	KOORDINACE IZOLACE	39
3.2	ZEMNÍ LANA.....	39
3.3	SVODIČE PŘEPĚTÍ	41
3.4	OCHRANNÉ JISKŘIŠTĚ.....	41
3.5	BLESKOJISTKY	41
3.5.1	<i>Růžková bleskojistka</i>	42
3.5.2	<i>Výfukovací bleskojistka</i>	43
3.5.3	<i>Ventilová bleskojistka</i>	43
3.5.4	<i>Průrazka</i>	45
3.6	KAPACITA JAKO PŘEPĚŤOVÁ OCHRANA.....	45
3.7	OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ	45
3.7.1	<i>Volba energetické třídy</i>	48
3.7.2	<i>Porcelánový omezovač ZnO</i>	48
4	SIMULACE PŘEPĚŤOVÉ OCHRANY.....	50
4.1	MATLAB-SIMULINK.....	50
4.2	PŘENOSOVÉ VEDENÍ VN.....	50
4.3	BLESKOVÝ VÝBOJ	52
4.4	PROPOJENÍ SIMULINK A SIMSCAPE	52
4.5	DIMENZOVÁNÍ PŘEPĚŤOVÉ OCHRANY	54
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	58
	SEZNAM TABULEK	60
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	61
	PŘÍLOHY	1

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá vznikem, charakterem a působením přepětí, které vzniká na distribučních a přenosových vedeních působením především atmosférického výboje (blesku) anebo spínacího přepětí, které vzniká vlivy přímo na síti.

Dále jsou popsány prvky ochrany, od nn až po vvn, které se užívají na vedeních, aby se vzniku přepětí zamezilo, anebo alespoň omezilo na příslušné hodnoty. Protože v případech, kdy by při každém zásahu blesku do vedení mělo být zničeno nebo poškozené drahé zařízení (např. transformátory), si nedovedeme představit, že bychom neměli nepřetržitý příjem elektrické energie. Díky těmto prvkům, které jsou dnes nedílnou součástí instalace nových rozvodných sítí, zajišťujeme ochranu nejen vedení, ale i všech zařízení připojených k síti. Od velkých transformátorů až po počítače v domácnosti.

Obsahem práce je řešení aplikace těchto prvků na síť pomocí simulačního programu MATLAB, ve kterém je cílem ukázat a nasimulovat vliv a působení přepětiové ochrany při vzniku atmosférického výboje, který zasáhne vedení.

Simulace probíhá v několika krocích. Prvním krokem je funkční model vedení, poté vytvoření přepětiového impulsu se známými parametry, který připojíme na vedení, a nakonec aplikování přepětiové ochrany, která je laděna, aby průběh napětí a proudu na zátěži nebyl destruktivní. Detailní postup při řešení simulace je popsán v poslední kapitole této bakalářské práce.

Důvodem výběru této práce z mé strany nebyla náhodná úvaha, ale zkušenost, ač nevýznamná, která se mi stala ve Švýcarsku v Alpách. Na vrcholcích se nacházeli stožáry s vedením a já jsem byl dotázán, co se děje s el. parametry, po zásahu blesku. I přes to, že jsem dokázal odpovědět více způsoby, v mysli mi tato otázka uvízla, protože jsem opravdu neznal skutečnost a mé odpovědi byly jen improvizace.

Seznam symbolů a zkratk

$L1, L2, L3$	Fázové vodiče napájecí soustavy
N	Střední pracovní vodič napájecí soustavy
$1f, 3f$	Počet fází
MATLAB	Matrix laboratoř
LP	Ochrana před bleskem (lightning protection)
SPM	Ochranná opatření pro vnitřní systém ochrany před elektromagnetickým impulsem vyvolaným bleskem (surge protection measures)
LPS	Systém ochrany před bleskem (lightning protection system)
LEMP	Atmosférické přepětí (lightning electromagnetic pulse)
SEMP	Spínací přepětí (switching electromagnetic pulse)
SPD	Přepět'ové ochranné zařízení (surge protective device)
LPL	Třída ochrany před bleskem (lightning protection level)
LPZ	Zóna ochrany před bleskem (lightning protection zone)
ZnO	Oxid zinečnatý
SiC	Karbid křemíku
V-A	Volt-ampérová charakteristika
AlFe	Lanový vodič hliník/ocel
nn	Nízké napětí
vn	Vysoké napětí
vvn	Velmi vysoké napětí
zvn	Zvlášť vysoké napětí
ABB	Asea Brown Boveri
I	Elektrický proud
A	Ampér, jednotka elektrického proudu
U	Elektrické napětí
α	Činitel nelinearity
%	Procento
h	Výška
U_c	Trvalé provozní napětí omezovače
U_r	Jmenovité napětí omezovače
U_n	Jmenovité napětí

kV	Kilovolt
V	Volt
t	Označení času
ČSN	Česká technická norma
DIN	Německá národní norma
kA	Kiloampér
mA	Miliampér
km	Kilometr
m	Metr
s	Sekunda
vf	Vysokofrekvenční
I_{IMP}	Impedanční proud (svodová schopnost)
U_p	Propustné napětí
U_Z	Zenerovo napětí
U_d	Napětí na diodě
I_{imp}	Zkušební impuls bleskového proudu
I_{MAX}	Zkušební proudový impuls
U_{MAX}	Zkušební napětový impuls

1 Přepětí v elektrizační soustavě

Přepětí je konkrétně definováno normou ČSN 33 4010. V provozu přenosové soustavy jsou menší napětíové změny zcela normální. Pokud napětí nepřesáhne stanovenou mezní odchylku - 10 % (nejvyšší provozní napětí sítě nebo soustavy) je tento jev v pořádku. Přesáhne-li však hodnota napětí v jakémkoliv místě soustavy tuto stanovenou mez, jedná se o definované přepětí, což je obvykle časově závislé zvýšení napětí mezi fázemi, nebo mezi fází a zemí. Přepětí se od místa jeho vzniku šíří na obě strany a související zvýšená hodnota proudu namáhá nejen vodiče, ale i zařízení a hlavně izolace tepelnými a dynamickými účinky. Přepětí je možné vyjadřovat špičkovou hodnotou ve voltech. [4] [5]

1.1 Základní pojmy

Před samostatným vnesením do problematiky je dobré si definovat odborné pojmy z oblasti ochrany před účinky bleskových proudů a dalších různých druhů přepětí, se kterými se zde setkáme.

Velká část těchto pojmů je opodstatněná z českých technických norem, například z normy ČSN EN 62305 - Ochrana před bleskem. Avšak nemalá část dalších pojmů z ochrany před účinky bleskových přepětí není dosud do národní české normalizace zavedena a proto se při překladech a publikacích využívá terminologických slovníků [1] [13]

Zkušební dočasné přepětí

Jedná se o přepětí síťové frekvence a vyznačuje se relativně dlouhou dobou trvání (100ky μ s) vzhledem k periodě síťového napětí. Nejčastěji se používá pro zkoušku svodičů bleskových proudů. Takové zkušební přepětí se provádí vlnou bleskového proudu o parametrech 10/350 μ sec a u svodičů přepětí méně náročnými rázovými vlnami - 8/20 μ sec. [1]

Nejvyšší pracovní napětí

Je to každé napětí, které je vyšší než dovolené provozní napětí sítě. V sítích pro 400 kV je tato odchylka $U_n + 5\%$ u všech sítí menších než 220 kV je to $+ 10\%$. Pokud napětí nepřesáhne odchylku, je vše v normě. Pokud napětí přesáhne odchylku, jedná se o tzv. přepětí. [1]

Nejvyšší napětí sítě U_s

Nejvyšší hodnota provozního napětí, která se může vyskytnout za normálního provozu v libovolném čase a na kterémkoli místě sítě. [1]

Příčné přepětí

Přepětí mezi pracovním vodičem a zemí (např. mezi vodičem L-PE a N-PE v síti nn nebo a-PE a b-PE v telekomunikační síti). [1] [12]

Podélné přepětí

Přepětí vznikající mezi pracovními vodiči (např. mezi vodiči L-N v síti nn nebo a-PE a b-PE v telekomunikační síti). [1] [12]

1.2 Rozdělení přepětí

Přepětí rozlišujeme:

- a) podle místa vzniku
- b) podle podmínek vzniku (atmosférické, spínací, dočasné)

Přepětí podle místa vzniku můžeme rozdělit na přepětí vznikající vůči zemi a na přepětí vzniklé mezi fázemi. Přepětí vznikající vůči zemi se vztahuje k nejvyššímu fázovému napětí přenosové soustavy. Přepětí mezi fázovými vodiči se vztahuje k nejvyššímu sdruženému napětí soustavy.

Přepětí podle podmínek vzniku následně rozlišujeme na přepětí **atmosférická, spínací** (provozní) a přepětí **dočasná**. Všechna tato přepětí vznikající dle určitých podmínek a spadají pod pulzní přepětí.

Pulzní přepětí lze definovat jako přechodový děj trvající nanosekundy až milisekundy. Řadíme ho k nejškodlivějším a výrazně nejnebezpečnějším vlivům ohrožujících obzvláště elektronická zařízení, která obsahují polovodičové součástky. [1] [4] [5] [12]

1.3 Vznik přepětí

Říci všeobecně důsledky vzniku přepětí nelze, protože je několik druhů přepětí a každé z nich se vyznačuje svojí charakteristikou. Přepětí v elektrických zařízeních vzniká z různých příčin.

Nejčastějšími příčinami jsou:

- přímý zásah blesku
- nepřímý zásah blesku
- přepětí vznikající při spínání či vypínání

Největší škody vznikají při přímém zásahu bleskem, který často způsobí požár a vzniku extrémních škody díky mohutnému uvolnění energie. [1]

1.4 Atmosférické přepětí

Též také označované jako lighting electromagnetic pulse. Atmosférické přepětí je přepětí vyvolané bleskem. Může nastat mezi fází a zemí, nebo mezi fázovými vodiči. Je způsobené především bouřkovou činností, konkrétně bleskovými výboji. Ty mají statistický charakter a v letních měsících nabývají záporné polarity a v zimních měsících, kdy vznikají sněhové bouře, kladné polarity. V porovnání se spínacím přepětím je atmosférické přepětí více ohrožující spolehlivost distribuční sítě, protože dosahuje vyšších úrovní. [8]

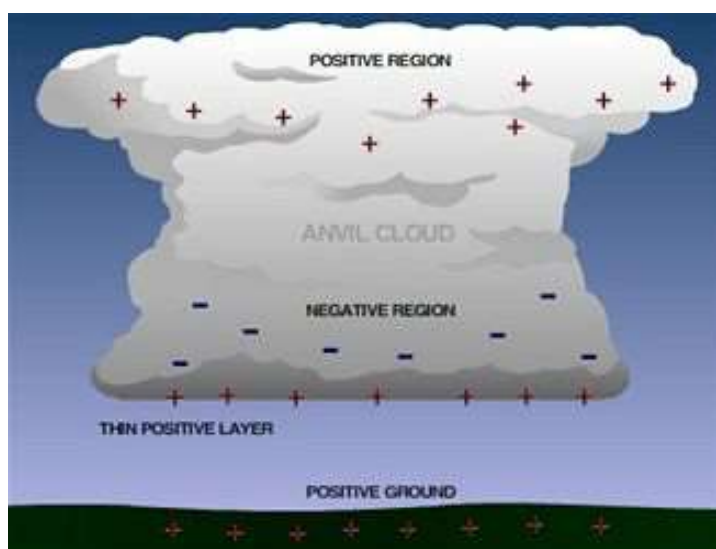
Nejvíce se přepětí z blesku projevuje na venkovních vedeních a ohrožuje elektrická a elektronická zařízení až do vzdálenosti 4 km na obě dvě strany od zásahu blesku. Nejkritičtější význam má vrcholová hodnota a strmost nárůstu proudu blesku. [6]

Vybíjení atmosférické elektřiny bleskem způsobuje vznik strmého elektromagnetického impulsu, který má na zasažená i vzdálenější zařízení rušivé až destrukční účinky. Velikost proudu bleskového výboje je až 200 kA. [6]

1.4.1 Blesk

Blesk je v podstatě elektrický výboj mezi elektricky nabitým mrakem a zemí, mezi dvěma a více mraky navzájem, nebo mezi jednotlivými částmi jednoho mraku.

Bouřkové mraky se tvoří vlivem tepla a větru ve výškách jednoho až pěti kilometrů. Celková výška mraku může dosahovat až dvanácti kilometrů. Jelikož teplý vlhký vzduch stoupá vzhůru, ve větších výškách z kondenzuje na vodní páru a tím se uvolní další teplo, které je nutné pro proudění. Po tomto kroku dochází znovu k ochlazení, tentokrát voda mění skupenství na pevné a začíná mrznout. Uvolňuje se další teplo, a proto vzduch dále stoupá. Výsledkem je vznik sněhových vloček a krup. Sněhové vločky s kladným nábojem se vyskytují v horní části mraku, protože jsou lehčí. Kroupy, větší a těžší útvary se nacházejí ve spodní části mraku a nesou záporný náboj. [1] [5] [14] [15]



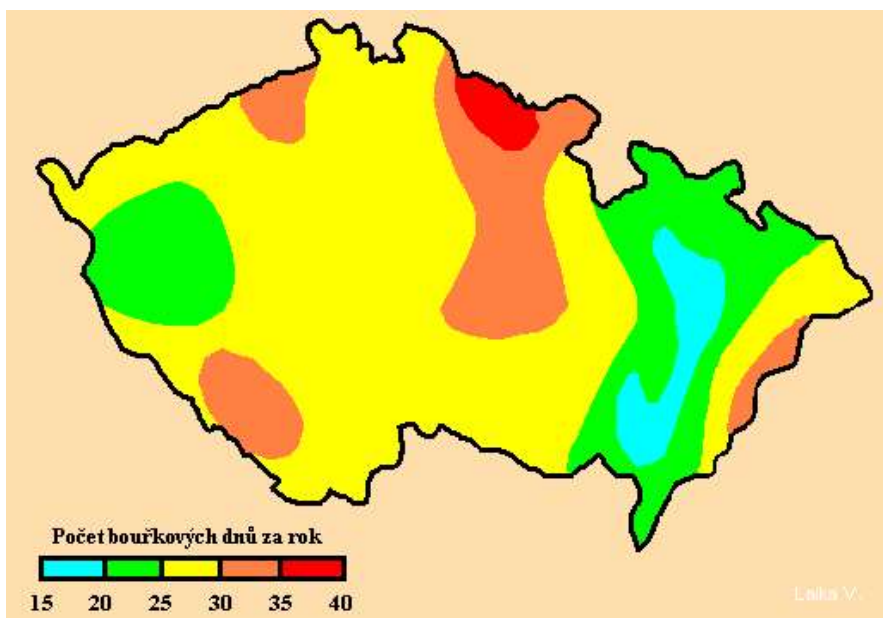
Obr. 1: Elektricky nabitý bouřkový mrak [14]

Blesk poté vzniká vynucením vyrovnání potenciálů. Vyrovnání potenciálu vznikne, pokud intenzita mezi různě nabitými prostředím a výbojem je přesažena elektrická pevnost daného prostředí. Bleskový výboj se šíří rychlostí až 90 km / s. Pozorováním úderů blesků na zemi byly objeveny takzvané vstříčné výboje. Tyto výboje míří naproti blesku až do výšky 50 m. Z toho vyplývá, že ke skutečnému uzavření obvodu dochází nad zemí. Místo spojení neustále stoupá rychlostí 80 000 km / s, což je označováno jako zpětný úder, způsobený neustálou ionizací atomů vzduchu. Takto se celý děj opakuje přibližně čtyřikrát. [5] [15]

V této chvíli jsme schopni pozorovat blesk, který se zdá jako by směřoval do země. [5]

Četnost bouřek závisí na dané lokalitě a samozřejmě ročním období. Důležitým parametrem, který je uváděn při klasifikaci bouřkové činnosti, je tzv. intenzita bouřkové činnosti. To značí četnost úderu blesku na km^2 za rok. Pro tento účel slouží tzv. izokeraunické (bleskové mapy), které vyznačují výskyt bouřek.

V zeměpisných šířkách mírného pásu se četnost úderu blesku pohybuje od 2 do 10 úderů na km^2 za rok a k bouřkám dochází přibližně v 10 až 40 dnech v roce. V porovnání se subtropickými a tropickými oblastmi je to až 10x menší četnost úderů na km^2 za rok. [4] [5]



Obr. 2: Izokeraunická mapa počtu bouřkových dnů na území ČR [3]

Bleskový výboj může být tvořen jedním výbojem, ve většině případů více výboji. Doba trvání blesku bývá v rozmezí tisícin až desítitisícin sekundy, proto se zdá, že jde jen o jeden výboj. Délka vodivého kanálu může dosahovat až 10 km a šířky 0,4 m. Teplota v trajektorii blesku se pohybuje okolo 20 000 °C. Amplituda napětí může být až 10 MV. [5] [15]

Bleskový výboj doprovází zvukový efekt, který vzniká rozpínáním vzduchu ve výbojovém kanálu. Zvuk se pohybuje pomaleji než světlo a tím vzniká časový posuv mezi obrazem a zvukem v místě pozorování. Tímto jevem lze přibližně odhadnout vzdálenost bouřkového mraku a vzniklých blesků. [5] [15]

Blesky můžeme rozdělit do kategorií například podle **charakteru tvaru** nebo podle **charakteru výboje**, který hraje důležitou roli z hlediska ochrany před účinky daného výboje. [5]

Dělení podle tvaru:

- a) **čárové** – klikatá, lomená jasně svítící čára, nejčastější
- b) **rozvětvený** – obrácená koruna stromu
- c) **plošný** – vzniká při výboji pouze mezi mraky, jeví se jako jasné světlo v mraku
- d) **perlový** – složen z několika kolových útvarů, spojených jednou čarou. Kolové útvary se objeví v jeden okamžik, ale mizí postupně.
- e) **kulový** - vypadá jako kulovitý útvar o průměru několika cm až dm, s různou barevností od žluté až modré a doba trvání se pohybuje od řádu sekund až po minutu [1] [5] [7] [11]

Dělení podle výboje:

- a) **Negativní výboj mrak – zem.** Postupuje směrem od mraku k zemskému povrchu (sestupný blesk) a přenáší záporný náboj.
- b) **Negativní výboj zem – mrak.** Mrak je nabitý záporně. Výboj postupuje směrem od zemského povrchu k mraku a přenáší kladný náboj ze zemského povrchu.
- c) **Pozitivní výboj mrak – zem.** Postupuje směrem od mraku k zemskému povrchu (sestupný blesk) a přenáší kladný náboj.
- d) **Pozitivní výboj zem – mrak.** Mrak je nabitý kladně. Bleskový výboj postupuje od zemského povrchu k mraku a přenáší záporný náboj ze zemského povrchu. [1] [5]

V České republice, v převážně ploché a nepříliš členité krajině, lze zpozorovat výhradně atmosférické výboje typu mrak – zem. Pouze ve vysokohorských oblastech či u výjimečně vysokých budov se vyskytuje i opačný typ výboje zem – mrak.

Rozdělení polarit bleskových výbojů je také jednoznačně nerovnoměrné, protože převažují výboje s negativní polaritou.

Dle dlouhodobých statistických měření bylo zjištěno, že 90 % všech atmosférických výbojů představují negativní výboje typu mrak – zem. Na zbylých 10 % připadají pozitivní atmosférické výboje. [1]

1.4.2 Přímý úder blesku

Údery blesků mohou zasáhnout objekty, budovy, elektrická vedení, vztyčené body nebo všechny možná místa, která blesk přijímají, přitahují. Takto můžeme údery blesků rozdělit na přímé a nepřímé. Hlavní rozdíl je v nežádoucích účincích atmosférického výboje na uvažovaný objekt nebo zařízení. [1] [6] [7]

Základní možné typy přímých úderů lze rozdělit na:

- přímý úder blesku do objektu bez vnější ochrany
- přímý úder blesku do objektu s vnější ochranou
- přímý úder blesku do nadzemního vedení nn
- přímý úder blesku do nadzemního vedení vn [1] [6] [7]

Přímý úder blesku do objektu bez vnější ochrany

Tento úder blesku je nejhorším možným hlavně z důvodu následných škod způsobených přímým bleskem do objektu. Vzniklý výboj a jeho části prochází skrze konstrukci, rozvody a veškeré vnitřní vybavení. Tím dochází k oteplování a vzniků rozdílů potenciálů. Z tohoto důvodu vznikají požáry, poškození instalačních a přístrojových svorek elektrických rozvodů, avšak v neposlední řadě dochází k ohrožení života a zdraví osob. [1] [6] [7]

Přímý úder blesku do objektu s vnější ochranou

Objekty s vnější ochranou mají definovanou vodivou dráhu pro svedení atmosférického výboje a teoreticky by do vnitřních prostor neměly pronikat žádné části bleskových proudů. Avšak i když je blesk sveden jímací soustavou do uzemňovací soustavy a ta je spojena s kovovými částmi a ochrannými vodiči, dojde krátkodobě ke zvýšení potenciálu na uzemňovací soustavě, celkově k rozdílu potenciálů.

Tím vznikne krátkodobé zvýšení napětí až na milion voltů. Tento děj má za následek poškození izolace, nebo velký nárůst vyrovnávacích proudů.

Rozsah celkových škod závisí především na tom, zdali je uzemňovací soustava propojena s vodivými částmi. Aby se zamezilo škodám, uzemňovací soustavu a ochranné vodiče lze propojit galvanickou vazbou. Pro pracovní vodiče se využívá tzv. ochrana před přepětím SPD. [1] [6] [7] [12]

Přímý úder blesku do nadzemního vedení nn

V tomto případě dochází k přepětové vlně po silovém vedení, která se šíří na vstupy připojených budov. Tato situace úderu blesku je pro uživatele velice nebezpečná, jelikož hrozí zavlečení podstatných částí bleskových proudů do budov a v nich instalovaných zařízení. Maximální hodnotu přepětových vln lze určit:

$$U = Z_0 \cdot \frac{I}{2} \quad (1.1)$$

U amplituda přepětové vlny

Z_0 charakteristická impedance vedení

I vrcholová hodnota proudu přeneseného výbojem do nadzemního vedení

[1] [5] [6] [7]

Přímý úder blesku do nadzemního vedení vn

Pokud se vyskytne úder na vn, je zde hodnota bleskového proudu podstatně mírnější, než při zásahu do nn vlivem oddělovacích transformátorů. Z hlediska koncových uživatelů není tento bleskový výboj natolik nebezpečný, ale stále může docházet k přenosu přepětových impulsů indukčními a kapacitními vazbami mezi vinutími transformátoru. Vzorec pro výpočet max. přepětí je stejný jako u zásahu blesku do nn. Rozdíly škod a působení přepětí lze dále rozčlenit podle toho, zdali blesk zasáhl do: vedení, stožáru vedení, nebo zemnicího lana. [1] [6] [7]

Zemnicí lano u stožárů slouží jako ochrana před atmosférickým přepětím. Ale při jeho zásahu může dojít k přeskoku na vedení při menší elektrické pevnosti prostředí, než je rozdílové napětí mezi lanem a vodičem.

1.4.3 Nepřímý úder blesku

Základní možné typy nepřímých úderů lze rozdělit na:

- blízký úder blesku
- vzdálený úder blesku [1]

Při nepřímých úderech blesku blízko vedení vzniká indukované napětí, které se pomocí elektrostatické a elektromagnetické indukce šíří rychlostí světla. Proti tomuto indukovanému přepětí se lze účinně bránit zemnicími lany. [5]

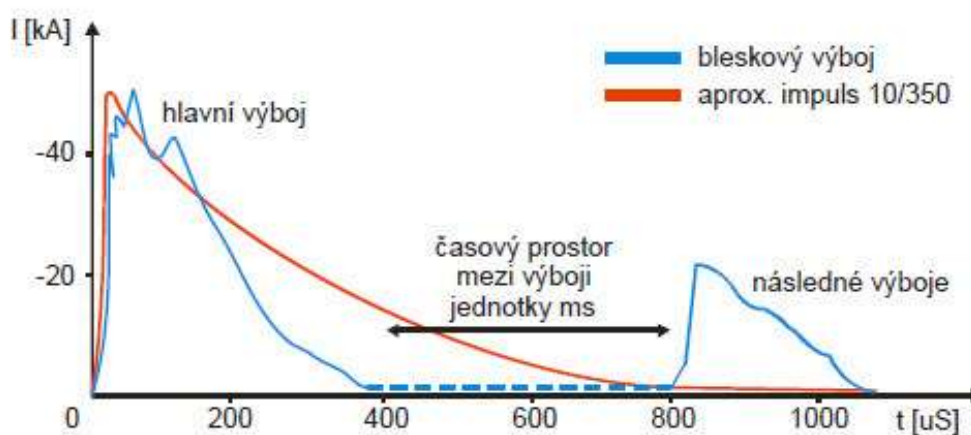
Blízký úder blesku

Blesk nemusí zasáhnout přímo objekt, budovu či vedení, ale pouze jeho okolí. To může mít za následek vznik elektromagnetické indukce. Ta díky galvanické, kapacitní a indukční vazbě v uzemňovacím systému umožňuje přenos přepětových impulsů mezi samotnými vedeními, nebo venkovními elektrickými rozvody. Jelikož je v 90 % proud blesku záporný, je polarita indukovaného přepětí většinou kladná. Indukované přepětí má menší velikost, než přepětí po přímém úderu. Tudíž jsou přepětí méně nebezpečná pro objekty chráněná svodiči přepětí, ale stále způsobují přeskoky a rozdíly potenciálů a tím i rozdíl několik stovek kilovoltů. Za blízký úder blesku lze považovat i stovky metrů vzdálený úder. [1] [6] [12]

Vzdálený úder blesku

Pokud blesk zasáhne mnohem dále od vedení či budovy, napětové vlny se spíše šíří po vedeních. Za vzdálený úder lze počítat všechny údery vzdálené přibližně do 2 km od nejbližšího vedení. Takto vzdálený úder má hlavní vliv na informační sítě a elektronická přenosová zařízení citlivá na přepětí. [1] [6]

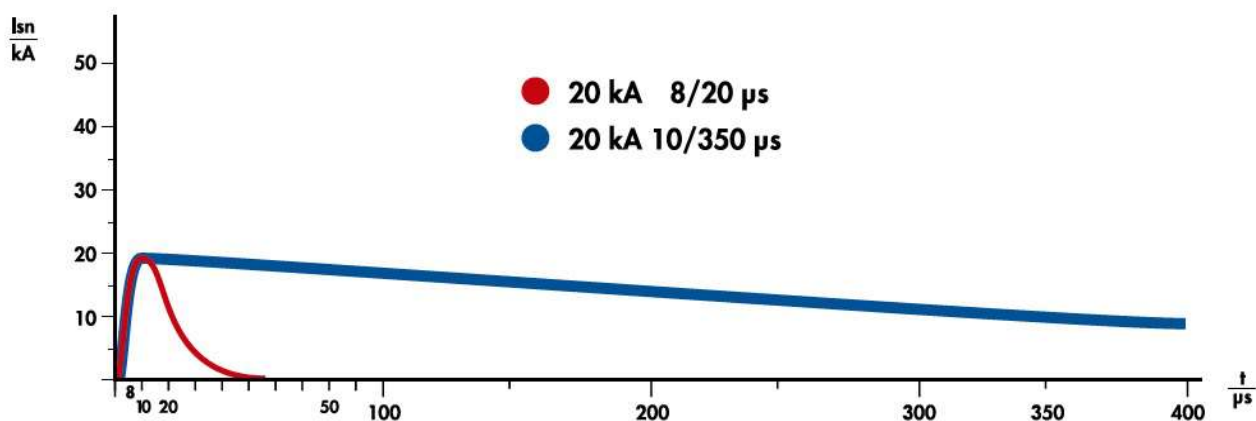
1.4.4 Průběh a parametry blesku



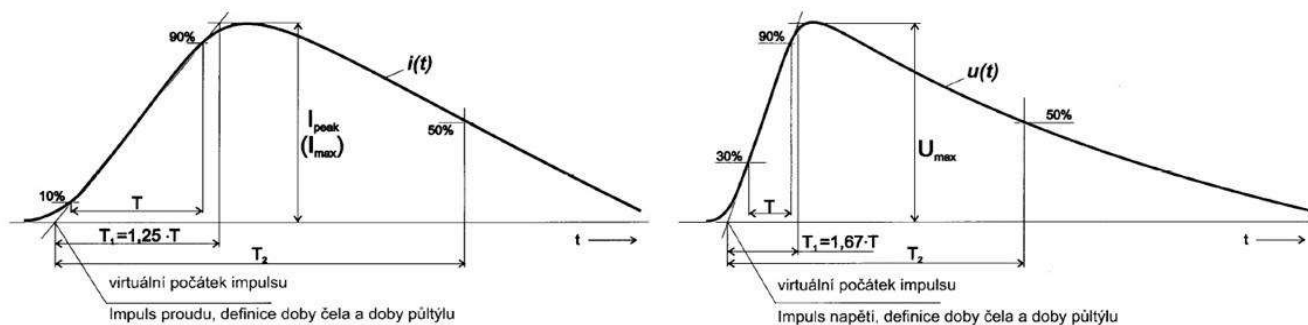
Obr. 3: Porovnání bleskového výboje a aproximačního impulsu 10/350 [1] [4]

Na obrázku vidíme porovnání bleskového výboje v praxi a aproximačního impulsu tvořený při zkouškách přepětových ochran, svodičů přepětí, které jsou tímto impulsem zatěžovány.

Schopnost svést přepětí je zkoušena podle IEC61643-1. Jelikož v praxi máme více tříd přepětových ochran, každá třída se zkouší jinou přepětovou vlnou. Svodiče přepětí třídy I jsou zkoušeny proudovou vlnou 10/350 μs . Tvar zkušební vlny splňuje požadavky na svedenou energii a náboj. Rozhodujícím parametrem je bleskový impulsní proud, měrná energie a náboj. Při srovnání se zkušební vlnou svodičů přepětí třídy II tedy vlnou 8/20 μs je vidět, že energie svedená svodičem bleskových proudů je mnohonásobně větší. [9]



Obr. 4: Porovnání průběhu zkušebních vln třídy I (10/350) a třídy II (8/20) [9]



Obr. 5: Průběh impulsu proudu a impulsu napětí [7]

Shrnutí používaných parametrů při zkouškách:

- zkušební impuls bleskového proudu I_{imp} – čas trvání čela $10 \mu s$, čas trvání půl-týlu $350 \mu s$, označovaný jako impuls 10/350 a je používán k simulaci bleskového proudu
- zkušební proudový impuls I_{MAX} – parametr 8/20, používá se k simulaci nepřímých účinků blesku a spínacích přepětí
- zkušební napěťový impuls U_{MAX} – charakterizovaný časem trvání čela vlny $1,2 \mu s$ a časem trvání půl-týlu $50 \mu s$ [10]

Následující tabulka vyznačuje typické hodnoty bleskových napětí a proudů, které se vyskytují na vodivých částech stavebních konstrukcí a metalickém vedení. [10]

	Přepětí (vrcholové hodnoty)	Proudy (vrcholové hodnoty)	Doba půltýlu
Přímý úder blesku	- až několik stovek kV	> 30 kA (50% všech blesků) > 100 kA (5% všech blesků) > 150 kA (1% všech blesků)	cca 200 μs 1000 μs
Galvanická vazba	- až několik desítek kV	vzdálené údery: do 1kA blízké údery: do několika kA přímé údery: několika desítek kA	typicky: cca 700 μs
Induktivní vazba	- příčná přepětí do několika kV - podélná přepětí do několika desítek kV	do několika kA do několika desítek kV	typicky: cca 20 μs
Kapacitní vazba	-příčná přepětí do několika kV - podélná přepětí do několika kV	do několika kA	typicky: 50 až 100 μs

Tab. 1: Porovnání velikostí napětí, proudů a časů jednotlivých vazeb vznikajících na metalickém vedení nebo vodivých částech stavební konstrukce [10]

1.4.5 Ochrana před bleskem

Pokud požadujeme maximální zabezpečení a ochranu lidí, zvířat a majetku, je důležité počítat s tím, že přímé i blízké údery, které jsou výjimkou, se mohou i s malou pravděpodobností stát hlavním rizikem a nelze je zanedbávat. Při vytváření systému ochrany proti blesku je důležité dbát na vhodně zvolená místa, kde dochází k přenosu potlačovaných přepětových jevů. Nejčastěji ve zdroji přepětí, v trase možného přenosu přepětí v cílovém zařízení.

Samozřejmě nejvhodnějším umístěním systému ochrany by byl první případ, ale to dnes stále nedokážeme a můžeme jen zmírnit následky přepětového výboje.

Ochranou před bleskem se konkrétně zabývá technická norma ČSN EN 62305, která je platná od roku 2006. Soubor této normy je identický s evropskými a mezinárodními normami, v ničem se neliší. Norma plně nahradila předchozí starší normu ČSN 34 1390, která byla platná do roku 2009.

Hlavní změnou od předchozí normy je zavedení ochran elektrických a elektronických zařízení, metoda valící se koule a tím vhodný návrh jímací soustavy a zóny ochran před bleskem.

Obsahem normy jsou 4 části zabývající se ochranou před účinky atmosférických výbojů. [13]

Rozdělení normy:

- 1.) Ohrožení bleskem (nebezpečí blesku, parametry blesku)
- 2.) Riziko blesku (odhad míry rizika z výboje blesku)
- 3.) Hmotné škody na stavbách a nebezpečí života (vnější ochrana před bleskem LPS)
- 4.) Elektrické a elektronické systémy ve stavbách (vnitřní ochrany SPM) [13]

1.5 Spínací přepětí

Se značí zkratkou **SEMP** (switching electromagnetic pulse).

Toto přepětí se vyskytuje v nn i vn sítích a vzniká při různých spínacích procesech nebo prudkých změnách parametrů sítě - zapnutí / vypnutí. Vrcholová hodnota přesahuje v některých případech 10 kV, závisí na uspořádání, impedanci a zátěže sítě.

Ve většině případů trvají pouze krátkou dobu, bývají utlumena a přechodný jev má oscilační průběh. [1] [4] [5]

Dochází k nim z těchto důvodů:

Vypínání kapacitních proudů

Vypínání malých indukčních proudů

Zapínání nebo opětovné zapínání nezátížených vedení

Vypínání zkratů

Zemní spojení v třífázových soustavách [4]

1.5.1 Vypínání kapacitních proudů

Při vypínání kondenzátoru nebo kondenzátorové baterie je důležité ve vypínači přerušit proud a to v okamžiku, kdy je proud nulový a napětí maximální. U zdroje probíhá napětí po tlumeném zakmitání dále po sinusovce zdroje a napětí na baterii zůstává stejné, které bylo při vypnutí.

Tímto vzniká na kontaktech vypínače rozdíl mezi napětími a může dojít k průrazu vypínače. Oscilace jsou brzo utlumeny a děj průrazu se může opakovat. Proto je důležité zvolit vhodný vypínač pro vypínání kapacitního proudu. [4] [5]

1.5.2 Vypínání malých indukčních proudů

Toto přepětí se vyskytuje u vypínání reaktorů, u transformátorů při chodu naprázdno, ale také u vypínání vn motorů s kotvou nakrátko za rozběhu. Přesně se nachází na

vypínačích, které mají určitou vypínací dráhu, a přepětí ji zde může prorazit. Pokud je dráha vypínače proražena, dochází k tzv. opětovnému přeskoku, to se opakuje do doby, dokud vzdálenost kontaktů není natolik vzdálená, aby nedošlo k opětovnému přeskoku v daném prostředí. Tento problém lze vyřešit připojenými paralelními odpory k vypínači nebo ventilovou bleskojistkou, která je připojena na svorky transformátoru. Nejjednodušším případem je však zvolení vhodného vypínače. [4] [5]

1.5.3 Vypínání zkratů

Při vypínání zkratu se kontakty vypínače začnou oddalovat a tím začíná mezi nimi hořet oblouk udržovaný zdrojem proudu. Hořící oblouk ustane, až když se kontakty vypínače od sebe dostatečně oddálí. Poté dojde k přerušení proudu. [4] [5]

Před ukončením hořícího oblouku je napětí mezi kontakty nulové, avšak okamžitě po přerušení proudu se na kontaktech objeví zotavené napětí, které bude určeno jen vlastnostmi sítě (platí u ideálního vypínače). Děj vznikající na vypínači výrazně ovlivňuje danou síť, ale i samotný vypínač. [4] [5]

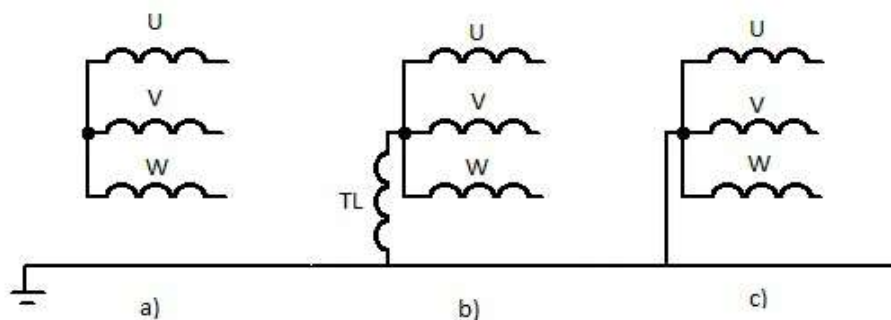
Zdrojem zkratového spínacího přepětí mohou být např. velké průmyslové stroje. [4] [5]

1.6 Dočasná přepětí

Jsou přepětí, která trvají více než několik milisekund a liší se od spínacích a atmosférických přepětí hlavně svojí dobou trvání. Mohou trvat právě až řády hodin a jsou to přepětí, která svým vlivem výrazně nepoškozují vedení ani zařízení. [4]

1.6.1 Zemní spojení v třífázových soustavách

V třífázové soustavě rozlišujeme 3 druhy uzemnění. Soustavu s **izolovaným uzlem**, to je soustava, která nemá nulový bod spojený se zemí. Dále je soustavu s **uzemněným uzlem**, nulový bod má spojený se zemí. Posledním druhem uzemnění je soustava s **nepřímo uzemněným uzlem**. Tato soustava má připojený nulový bod přes zhášecí tlumivku nebo odpor. Jelikož tyto součástky mají malý činný odpor, tak při zkratu redukují přechodné oscilace a vylepšují podmínky pro selektivní zemní ochranu. [4] [5]



Obr. 6: Způsob uzemnění nulového bodu: a) izolovaný uzel b) nepřímě uzemněný uzel c) uzemněný uzel [5]

1.6.2 Zapínání nebo opětovné zapínání nezatížených vedení

Přepětí při opakovaném zapínání nezatížených vedení, tím máme na mysli přepětí vzniklá zapínáním kondenzátorové baterie, transformátoru na prázdko, reaktorů, vn motorů mohou ohrozit izolaci zařízení.

Při samotném vypnutí transformátoru na prázdko, přepětí na izolaci nemá vliv, proto se neklade důraz na dimenzování izolace. Tudíž se toto přepětí využívá hlavně pro dimenzování izolace. [4] [5]

2 Přepětové ochrany pro napětovou síť nn

Nízké napětí je definováno rozsahem od 50 V do 1000 V. Jedná se o nejnižší distribuční síť využívanou v ČR, která se nachází u všech koncových odběratelů elektrické energie. Hladina nízkého napětí je nejčastěji dimenzována na 230 V nebo 400 V (sdružené), nachází se ve všech domácnostech a jsou na ni navrhovány všechny domácí spotřebiče. S tím souvisí rozvoj a vývoj nových přepětových ochran, které zabrání poškození spotřebičů a slaboproudé elektroniky.

Ochrany před bleskem rozdělíme na vnější a vnitřní a postupně si je vysvětlíme.

Zprvu se budeme okrajově zabývat vnější ochranou, která je efektivní proti atmosférickému přepětí a všeobecně je známa pod pojmem bleskosvod nebo hromosvod a poté přímo prvky pro vnitřní ochranu.

Bleskosvod nám vytváří vodivou cestu ke svedení výboje blesku do země a je konstruován tak, aby blesk na sebe přijímal. Umisťuje se tak vysoko, aby chráněný objekt ležel v jeho ochranném prostoru. Jak víme z předchozích kapitol, blesk dosahuje vysokých hodnot proudu a napětí (až tisíce volt, ampér) a tudíž při úderu blesku dochází k ohromnému vydání energie. Tento přechod energie samozřejmě s sebou nese teplotní účinky, a pokud objekt není vybaven vnější přepětovou ochranou (bleskosvodem), dochází k poškození objektu nejen z elektrického hlediska, ale hlavně k požárům nebo k destrukcím částí staveb. [1]

2.1 Vnější přepětová ochrana

Bleskosvod obsahuje vždy tři hlavní části, které musí být společně vodivě pospojovány.

- jímací zařízení

- svod

- uzemnění

Dále může být hromosvod izolovaný (spojený s potenciálovým vyrovnáním) nebo běžně aplikovaný- neizolovaný (tyčový, mřížový, hřebenový bleskosvod). [1] [7]

2.1.1 Jímací zařízení

Skládá se z tyčí, které tvoří nejvyšší vztyčný bod na objektu, drátů z hliníku, mědi nebo pozinkované oceli. Základním úkolem je zachytit veškeré bleskové výboje, které směřují k chráněnému objektu nebo chráněnému prostoru.

Pro návrh jímacího zařízení lze postupovat podle normy ČSN EN 62305 a lze využít tyto metody:

-metoda ochranného úhlu

-metoda mřížové jímací soustavy

-metoda bleskové koule

Metoda bleskové koule má všeobecnou platnost a je dnes nejvyžívanější pro návrhy jímacích zařízení, protože metoda ochranného úhlu a mřížové jímací soustavy platí jen pro určité typy objektů. [1] [7]

2.1.2 Svod

Zajistí svedení proudu od jímacího zařízení do uzemňovací soustavy. Při realizování svodů je třeba dodržovat daná pravidla:

- vytvoření několika paralelních vodivých cest
- zajištění co nejkratší cesty od jímačů k zemničům
- propojení všech vodivých částí stavebního objektu

Pokud je vytvořeno několik paralelních větví rozmístěných rovnoměrně po obvodě, zvyšuje se vodivost svodu a rovnoměrně se rozdělí proud. Tak snížíme velikost proudu v jednotlivých svodech. Svody by měly být rozmístěny v blízkosti rohů budovy a rovnoměrně podél jeho obvodových stěn. Vzdálenost mezi svody určuje norma ČSN EN 62305-3 na základě zařazení objektu do tříd ochran před bleskem. Svody nesmějí být umístovány na místa, kde hrozí zvýšené riziko koroze. To jsou místa se zvýšenou vlhkostí, okapy, odpadní trubky. Vždy je nutné dodržet minimální vzdálenosti od materiálu podkladu s ohledem na jeho hořlavost.

Mezi svod a uzemňovací soustavu se vždy umísťuje zkušební (měřící) svorka, která musí být rozpojitelná pomocí náradí a umísťuje se na každý svod. Lze ji umístit vně objektu a to ve výši: 1,8-2 m nebo skrytě v krabičce a to pokud jsou svody vedeny pod omítkou. Krabička má být ve výši 0,6-1,8 m a musí být dostatečně prostorná pro manipulaci s náradím. [1] [7]

Třída ochrany LPL	Vzdálenost mezi svody [m]
I	10
II	10
III	15
IV	20

Tab. 2: Určení vzdálenosti mezi svody [1]

2.1.3 Uzemnění

Je nedílnou součástí hromosvodu a má za úkol svést atmosférický výboj pod zemský povrch a rozptýlit ho. Podmínkou správné funkce je celková kvalita pospojování všech kovových konstrukcí, které vedou do objektu a vzájemné propojení se všemi náhodnými zemniči. [1]

Kritériem pro spolehlivý přechod proudu do země je považován tvar a rozměry uzemňovací soustavy. Celkový odpor uzemňovací soustavy by měl být v ideálním případě menší než 10Ω . Tento odpor závisí na uložení zemnicí soustavy do země. Hloubka uložení nebo délka zemnicí soustavy závisí na rezistivitě půdy a stanovuje se podle tabulek. [1]

2.2 Vnitřní přepětové ochrany

Funkcí vnitřní ochrany před bleskem je zabránění vzniku rozdílů potenciálů, neboli jiskření uvnitř stavby za pomoci ekvipotencionálního pospojování nebo dodržení dostatečné vzdálenosti mezi vnějším systémem ochrany a vnitřními vodivými součástmi. Norma ČSN 62305 doporučuje třístupňovou ochranu rozvodu nn. Klasicky se omezení přepětí provádí ve třech stupních, kde každý stupeň zmenší přepětí na stanovenou hodnotu. Instalace těchto tří stupňů se umísťuje do jednotlivých zón. [7] [13]

2.2.1 Zóny ochrany před bleskem - LPZ

Pomocí zón ochrany před bleskem rozdělujeme chráněný prostor a charakterizujeme zásadní zlomy elektromagnetických podmínek v hraničních oblastech. Jde o významnou pomůcku při výběru ochranných opatření před bleskem.

Typ zóny	Charakteristika zóny	Ohrožení
LPZ 0A	Přímé ohrožení přímým úderem blesku a plným elektromagnetickým polem	Vnitřní systémy mohou být vystaveny plnému nebo dílčímu impulsnímu bleskovému proudu
LPZ 0B	Chráněno proti přímým účinkům blesku, hrozba plného elektromagnetického pole blesku	Vnitřní systémy mohou být vystaveny dílčím impulsním proudům blesku
LPZ 1	Impulsní proud je omezen rozdělením proudu a izolačním rozhraním a nebo přepětovým ochranným zařízením	Elektromagnetické pole blesku můžeme snížit pomocí prostorového stínění
LPZ 2,...	Impulsní proud je omezen rozdělením proudu a izolačním rozhraním a nebo dalším přepětovým ochranným zařízením	Další elektromagnetické pole blesku můžeme snížit pomocí dalšího prostorového stínění

Tab. 3: Zóny ochrany před bleskem [6]

2.2.2 Stupně ochrany

1. stupeň - zajišťuje hrubou ochranu stavby a instaluje se na rozhraní LPZ 0 a LPZ 1. Tento stupeň ochrany zachycuje největší část přepětové vlny a bezpečně odvádí její podstatnou část. Mohou zde být použity svodiče bleskových proudů třídy B podle DIN VDE 0675 (německá národní norma) nebo ochranné zařízení třídy I nazývaná jiskřiště, která se dělí na otevřená nebo uzavřená. Svodová schopnost jiskřišť je až 50 kA impulsního svodového proudu. Ochranná zařízení jsou zkoušena rázovou vlnou bleskového proudu 10/350 μ s a umisťují se do hlavních rozvaděčů. [4] [6] [7]

2. stupeň – zajišťuje střední ochranu a instaluje se na rozhraní LPZ 1 a LPZ 2. Jde o zařízení ochrany před přepětím třídy II, případně svodičů přepětí třídy C. Zachycují střední část přepětové vlny a svodová schopnost těchto zařízení je až $I_{IMP} = 20$ kA. Jako ochranná zařízení jsou použity varistory, které jsou zkoušeny vlnou bleskového proudu 8/20 μ s. V některých případech je lze použít i bez aplikace 1. stupně, ale primárně se instalují za svodiče na bázi jiskřiště a montují se do podružných rozvaděčů. [4] [6] [7]

3. stupeň – zajišťují jemnou ochranu a instalují se na rozhraní LPZ 2 a LPZ 3. Jde o zařízení ochrany před přepětím třídy III, případně svodičů přepětí třídy D. Používá se pro spolehlivé zajištění ochrany. Ochrany 3. stupně jsou zkoušeny též zkušební vlnou 8/20 μ s a užívají se pro tento stupeň varistory, nebo supresorové diody. Tento stupeň ochrany se musí instalovat těsně před chráněný spotřebič za případu, že je délka spotřebiče od 2. stupně ochrany větší než 5m. Pokud by byla vzdálenost spotřebičů od 2. stupně menší než 5 m, není potřeba 3. stupně. Pro náročnější a složitější ochranu se doplňují supresorové diody frekvenčním filtrem. Filtry mají velmi rychlou odezvu - v řádu ns, umisťují se do zásuvkových adapterů a používají se u zařízení s řídicím procesorem a pamětí, u nichž může dojít k poškození vf pulsem. Třetí stupeň v kombinaci s vf filtrem je nejčastěji využíván jako zásuvkový adaptér pro připojení televizí nebo počítačů, které jsou připojeny na anténní, satelitní nebo telekomunikační síť. [4] [6] [7]

2.2.3 Jiskřiště

Je základní a nejjednodušší svodič přepětí. Jiskřiště se připojují paralelně k chráněnému zařízení a zajišťují omezení maximální hodnoty napětí, než je dovolené na chráněném zařízení. V principu funkce je to napětově závislý nelineární prvek, který mění impedanci s rostoucím napětím. Uzavřené jiskřiště se skládá ze vzduchové komory a dvou nebo třech kovových/uhlíkových elektrod. Otevřené jiskřiště se skládá z komory, která není naplněna vzduchem, ale vzácnými plyny, a proto je konstrukce uzpůsobena pro vyfukování žhavé plynné směsi. Vzdálenost elektrod stanovuje hodnotu **zapalovacího** nebo také **aktivačního** napětí, při kterém dojde k vyrovnání potenciálů mezi elektrodami pomocí elektrického výboje. Pokud je hodnota napětí na svorkách jiskřiště menší než zapalovací napětí, jeví se jako "rozpojené". Impedance mezi svorkami velmi vysoká-bližící se nekonečnu. Pokud napětí na svorkách jiskřiště překročí mez zapalovacího napětí, dojde k vytvoření obloukového výboje mezi póly jiskřiště a impedance se skokově sníží k blízké hodnotě nula. Při tomto hoření oblouku se skokově sníží hodnota napětí jiskřiště na tzv. **napětí obloukové**. To trvá do doby, než proud, který protéká jiskřištěm, neklesne na tzv. **přídržnou hodnotu**. Poté dojde k zhasnutí oblouku a k obnovení nevodivých vlastností-vysoká impedance. [2] [4] [6] [8] [19]

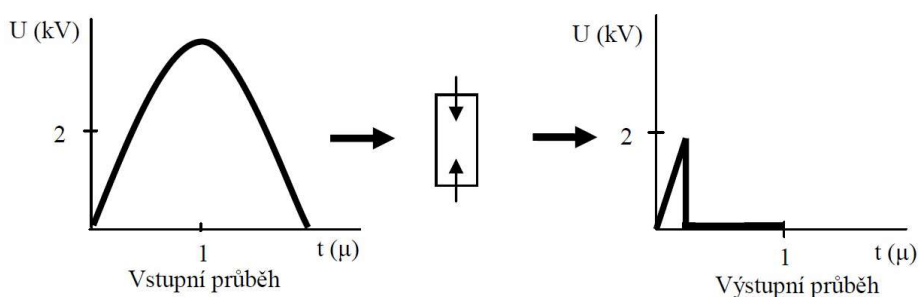
Výhodou je úspěšné zvládnutí zkušební proudové vlny o délce trvání 10/350 μ s, tedy svedení velkých impulsních proudů o malém svorkovém napětí a to opakovaně.

Nevýhodné je využití jiskřišť v přenosových soustavách (stejnoseměrný proud), protože i po odeznění přepětí má jiskřiště malou impedanci, jelikož oblouk mezi elektrodami je dále udržován jmenovitým napětím sítě. Proto je nutné danou část sítě vypnout přerušit dodávku elektrické energie, což je nežádoucí jev.

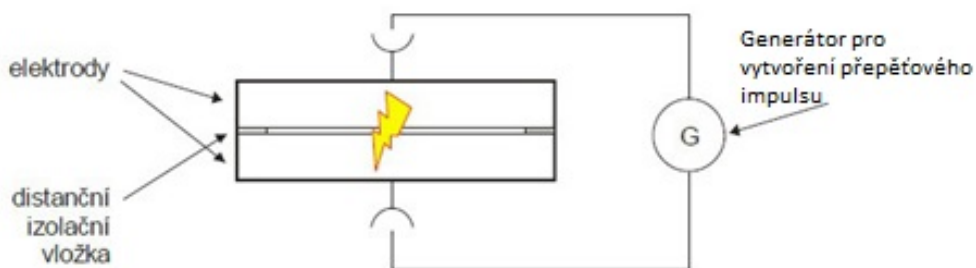
Další nevýhodou je vyfukování plynné směsi u otevřených jiskřišť. Je důležité dbát na vhodné umístění v rozvaděči dle pokynů výrobce. Dále má jiskřiště příliš pomalou odezvu na vstupní napětový skok, který je závislý na době vytvoření oblouku mezi elektrodami. Doba reakce je přibližně 100 ns. Proto vhodné využití jiskřišť dnes uplatňujeme při ochraně domovních/slaboproudých rozvodů. [2] [4] [6] [8] [19]



Obr. 7: Svodič přepětí-jiskřiště do domovního rozvaděče [10]



Obr. 8: Pracovní charakteristika jiskřiště před a po omezení úrovně a doby trvání přepětí [1]



Obr. 9: Jednoduché uspořádání jiskřiště [1]

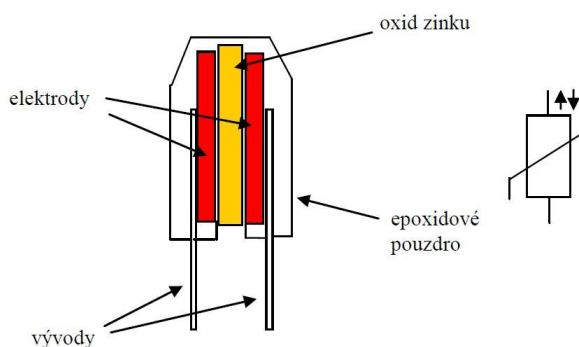
2.2.4 Varistor

Je napětově závislý nelineární odpor (obr. 10), který se vyznačuje především nelineární voltampérovou charakteristikou. V-A charakteristika je určena především vlastnostmi použitého polovodiče (dnes nejčastěji polovodiče ZnO nebo SiC). [1] [4] [5] [10]



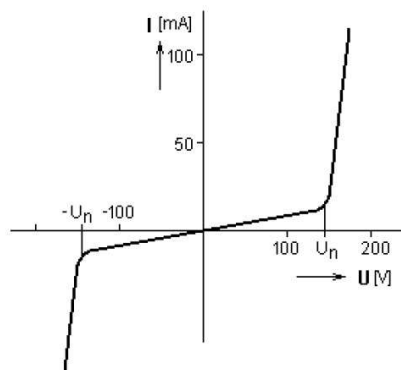
Obr. 10: Varistor do domovních rozvodů [10]

Je vyroben slisováním a spékáním práškové směsi při teplotě 1200 °C, která se skládá z oxidů kovů. Obsah tvoří 90 % kysličníku zinečnatého (ZnO) jako keramický základ a 10 % přísad jako příměs kysličníku. Přísady zde slouží pro růst zrn a tvorbu hradlové vrstvy mezi zrny ZnO. V menších energetických zátěžích jsou většinou zality v epoxidové pryskyřici (obr. 11).



Obr. 11: Řez varistoru a schématická značka [6]

Varistor je bezjiskřišťový omezovač přepětí, který pracuje na principu skokové změny impedance, podobně jako u jiskřiště, avšak princip je úplně jiný. Je-li na svorkách varistoru hodnota napětí nižší než tzv. **kritická hodnota napětí**, má varistor vysokou impedanci a chová se jako "rozpojený". Při kritické hodnotě napětí se ve varistoru začne zvyšovat hodnota protékajícího proudu lavinovým způsobem. Zvýšení lavinové hodnoty proudu má za následek výrazné zvyšování teploty v lokálních mikro oblastech. To zapříčiní další lavinový nárůst proudu až do stavu kdy se varistor "otevře" (obr. 7). [1] [2] [4] [5] [6]



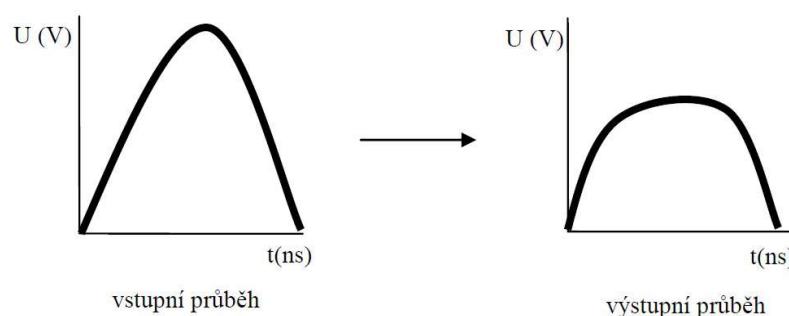
Obr. 12: V-A charakteristika varistoru [4]

Poté hodnota napětí značně klesne pod hodnotu kritickou. To trvá do té doby, dokud proud varistorem neklesne pod tzv. **kritickou**, neboli **přidržnou** hodnotu. Důležitou vlastností varistorů je jejich vybavovací doba po příchodu rázové vlny napětí, která má zpoždění typicky cca 25 ns.

Výhodou varistorů je jejich bezproblémové fungování ve střídavých i stejnosměrných obvodech a samozřejmě rychlost reakce na změnu napětí.

Nevýhodou je, že nezkracují dobu trvání přepětové vlny jako jiskřiště (porovnání obr. 8 a 13) a mají podstatně menší schopnost svodu bleskového proudu. Proto se ve slaboproudých rozvodech využívají až jako druhá ochrana (stupeň 2) před bleskem po jiskřišti. Další nevýhodou je tepelné namáhání zahříváním, kvůli průtoku vysokých proudů, což je hlavní činitel, který snižuje životnost varistoru.

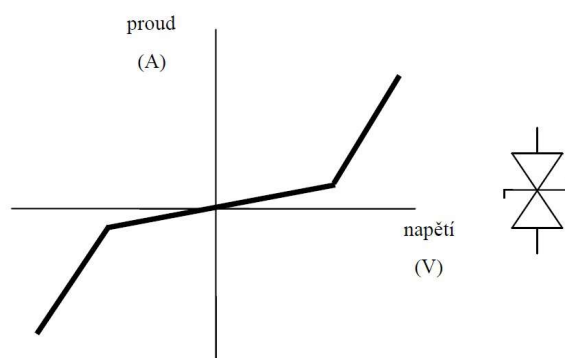
Varistory se nevyužívají jen ve slaboproudých střídavých obvodech, ale našli své uplatnění i ve stejnosměrných distribučních sítích od vn až zvn, kde se používají jako tzv. omezovače ZnO. [2] [4] [6]



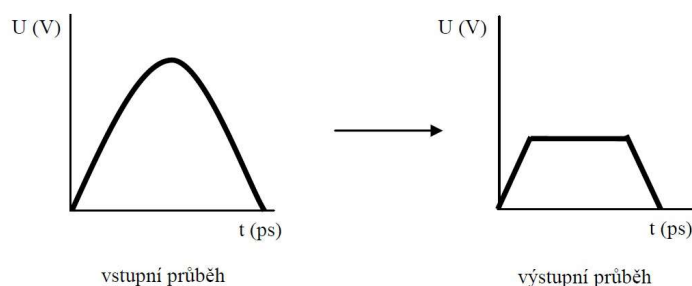
Obr. 13: Omezující charakteristika varistoru [1]

2.2.5 Supresorová dioda

Jedná se o polovodičovou součástku, která má voltampérovou charakteristiku podobnou Zenerově diodě v závěrné části, ale závěrná část je symetrická (obr.14). Předností supresorové diody je velká strmost V-A charakteristiky a velmi rychlá reakce spínacího času na napěťový skok v řádech pikosekund, což je značná výhoda (obr. 15). Nevýhodou supresorové diody je menší přípustná hodnota proudu (max. stovky ampér), která může projít diodou. Proto se nehodí k přímému svodu bleskových proudů a používá se jako nejjemnější přepětová ochrana (stupeň 3) v kombinaci s varistory a jiskřišti. Jejich využití je nejčastěji před méně energetickými přepětovými impulsy např. v rychlých datových přenosech nebo ochraně slaboproudé elektroniky citlivé na vf rušení (PC, TV). [6]



Obr. 14: V-A charakteristika supresorové diody [1]

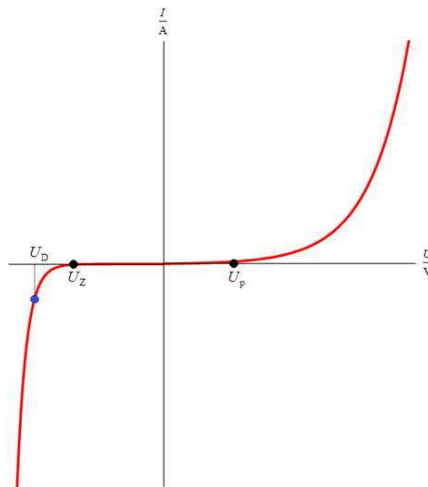


Obr. 15: Omezující charakteristika supresorové diody [1] [6]

2.2.6 Zenerova dioda

Je polovodičová součástka skládající se z přechodu PN a jedná se o nezákladnější stabilizátorový prvek využívaný v elektrických obvodech. Její využití nacházíme v závěrném směru V-A charakteristiky, při kterém dochází ke stabilizaci napětí. Do obvodu se zapojuje v závěrném směru, opačně než veškeré jiné diody a dochází k Zenerovu průrazu, kdy vede elektrický proud. Z V-A charakteristiky je vidět, že při

téměř konstantním napětí v závěrném směru roste elektrický proud. Využití je takové, že při měnícím se zátěžovém proudu zůstává napětí např. na spotřebiči stejné (stabilní). [17]



Obr. 16: V-A charakteristika Zenerovy diody [17]

U_p - propustné napětí

U_z - průrazné (Zenerovo) napětí

U_d - napětí na diodě

2.2.7 Transil

Jde o napětově závislý polovodičový prvek s podobnou V-A charakteristikou jako má Zenerova dioda. Tj. pokud je hodnota napětí na svorkách transilu nižší než hodnota ochranného napětí, protéká jím nepatrný proud a prvek se chová jako rozpojený-vysoká impedance. Velikost ochranného napětí se udává při jmenovitém měřícím proudu 1 mA. Pokud se hodnota napětí zvýší nad hodnotu ochranného napětí, strmě klesá hodnota tzv. diferenciální impedance. To znamená, že hodnota napětí na transilu neklesá pod hodnotu ochranného napětí, ani pokud je v otevřeném stavu - malá impedance. To je hlavní rozdíl od přepětových ochran, jako je varistor či jiskřiště, kde napětí klesne pod hodnotu ochranného napětí. [2]



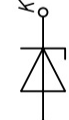
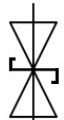
2.2.8 Trisil

Jde o napětově závislý polovodičový prvek s podobnou V-A charakteristikou jako má čtyřvrstvá dioda. Tj. pokud je hodnota napětí na svorkách trisilu nižší než hodnota ochranného napětí, protéká jím nepatrný proud a prvek se chová jako rozpojen - vysoká

impedance. Velikost ochranného napětí se též udává při jmenovitém měřícím proudu 1 mA. Pokud se hodnota napětí zvýší nad hodnotu ochranného napětí, strmě klesá hodnota tzv. diferenciální impedance a současně dochází i k okamžité změně napětí. Tato vlastnost u trisilů je značnou výhodou a využívá se pro odpojení chráněných přístrojů pomocí pomalé pojistky od napájecí sítě.

Shrnutí je takové, že trisil a trisil reagují na příchod rázové vlny přepětí s velice malým zpožděním v řádu desítek až stovek pikosekund. [2]

2.2.9 Porovnání přepětových ochran používaných pro nn

Název	Plymem plněné bleskojistky (výbojky)	Varistory (Voltage dependent Resistors – VDR)	Klasické Zenerovy diody	Supresorové diody (Transient Absorbing Zener – TAZ diody)
Schematická značka				
Ochranné napětí [V]	10 ÷ 12 000	6 ÷ 2 000	2,4 ÷ 200	6 ÷ 440
Max. proud po dobu 1 ms [A]	500	120	10	200
Max. absorbovaná energie [J]	60	2 000	0,1	1
Přípustné výkonové zatížení [W]	800	2	50	5
Vlastní kapacita [pF]	0,5 ÷ 10	40 ÷ 40 000	5 ÷ 15 000	300 ÷ 15 000
Doba reakce [ns]	➤ 1 000	25	10	0,01
Druh ochrany	Hrubá	Hrubá	Jemná	jemná

Tab. 4: Porovnání přepětových ochran pro nn

2.3 Koordinace činnosti přepětových ochran

Vhodným a prakticky nejlepším vysvětlením koordinace přepětové ochrany je situace v rozvodu napájecí sítě nn. Z předchozího předvedení přepětových ochran známe jejich vlastnosti a víme jak aplikovat 3 stupňovou ochranu v rozvodu nn. Obvod se bude skládat z jiskřiště, které zajišťuje první stupeň ochrany (hrubé), dále varistoru druhého stupně a nakonec jemné ochrany např. supresorové diody. Důležitou vlastností jsou vybavovací reakční časy těchto prvků (jiskřiště-cca 100 ns, varistor-cca 25 ns, supresorová dioda-cca 100 ps). Mezi tyto prvky je nutné umístit **oddělovací impedanci**, kterou nejjednodušeji vytvoříme instalací 15 m kabelu nebo pomocí tlumivky. Funkce tlumivky nebo 15 m kabelu zajišťuje **omezení maximálních hodnot impulzních proudů** a dostatečné **časové**

zpoždění nárůstu sváděného proudu mezi svodičem bleskového proudu (jiskřištěm) a svodičem přepětí.

Pokud přijde rázová vlna napětí na uvažovaný systém o době trvání proudové rázové vlny 20/350 μs a nebude použita tzv. **oddělovací impedance**, začne nejprve reagovat varistor, který tento nápor energie nevydrží a "odejde". Hned poté se zničí jemná ochrana a chráněné zařízení a až po cca 75 ns se zcela zbytečně aktivuje jiskřiště, protože má nejpomalejší reakci a už nic bohužel nechrání. Při použití správně oddělovací impedance je situace taková: Po příchodu rázové vlny napětí začne varistorem protékat omezený rázový proud se zpožděním 25 ns (to je vlastnost oddělovací impedance), který se následně zvyšuje. Po cca 75 ns se zaktivuje jiskřiště a podstatnou část bleskového proudu pohltí, čímž uleví varistoru a zachrání připojené přístroje před zničením. [2] [18]

3 Prvky ochrany proti přepětí na síti vn, vvn, zvn

Energetické sítě vn, vvn a zvn se z ekonomického hlediska chrání pouze proti atmosférickému přepětí, protože hodnoty spínacích přepětí tu dosahují nižších úrovní a není třeba vedení proti těmto přepětím chránit. Vedení lze chránit bleskojistkami, které se však používaly do konce sedmdesátých let a byly vytlačeny tzv. omezovači přepětí ZnO). [2] [4]

3.1 Koordinace izolace

Stanovuje volbu elektrické pevnosti zařízení na základě vyskytujícího se napětí v provozované síti a instalovaných přepětových ochran, které se zde vyskytují. Cílem koordinace izolace je dosáhnout co nejnižší výpadkovosti a poruchovosti zařízení, při minimálních nákladech na realizovaná opatření. Při hodnocení se přihlíží k charakteristikám jisticích prvků, aby byl zajištěn nepřerušovaný provoz a zároveň aby izolace nebyla zbytečně předimenzována. Hodnoty nejvyšších přepětí jsou uvedeny v ČSN 33 2000-4-443. [2] [4] [5]

3.2 Zemní lana

Zemní lana neslouží jako přepětová ochrana, tedy jako opatření pro snížení přepětí, ale jako ochrana vedení před atmosférickým výbojem, které je pro vedení nejrizikovější. Tato lana jsou tažena souběžně s fázovými vodiči. Ve většině případů se jedná

o jednoduchá zemní lana AlFe s průřezem 50mm^2 . Jsou umístěna tak, aby pravděpodobnost úderu blesku do fázových vodičů byla menší, než do zemnicího lana. Umístění vychází z teorie ochranného prostoru s užitím teorie výstavby bleskového výboje. To v praxi znamená, že vůdčí výboj je od určité výšky přitahován k nejvyššímu objektu na povrchu země. Vzdálenost, na kterou je blesk přitahován se nazývá ochranná vzdálenost a ta je poloměrem ochranného prostoru se středem v místě vzniku výboje. Ochranná vzdálenost se udává vztahem:

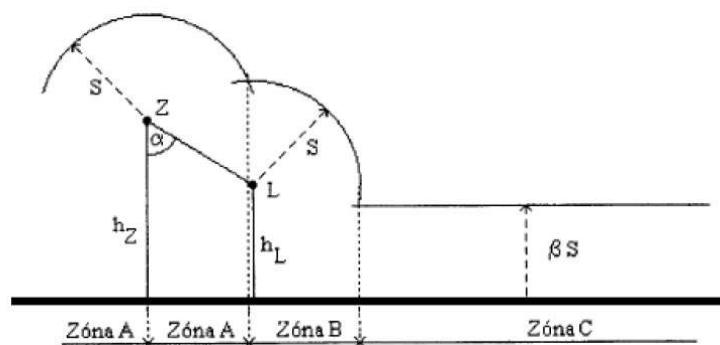
$$S = 10 \cdot I^{2/3} \quad (3.2)$$

S = ochranná vzdálenost

I = proud [kA]

[4]

Obrázek 5 znázorňuje ochranný prostor vedení se zemním lanem. Lano je umístěno s ochranným úhlem α . Ochranný úhel může být maximálně 30° dle normy ČSN EN 38 0810. Obrázek značí, že pokud se přibližuje výboj k zemi v zóně A, bude přitahován k zemnímu lanu. Při šíření výboje v zóně C bude přitahován k zemskému povrchu. Zóna B značí nechráněný úhel. Zde bude výboj přitahován k fázovému vodiči. Zóna B se zmenšuje s rostoucím proudem výboje, zmenšením ochranného úhlu nebo použitím dvou zemnicích lan. [2] [4]



Obr. 17: Aplikace zemního lana na vedení, Z-zemní lano, L-fázový vodič, S-poloměr, α -ochranný úhel, h_Z -výška zemního lana, h_L -výška fázového vodiče[2]

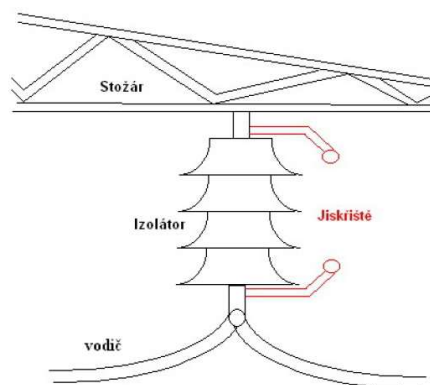
Pojem výběhové lano je též zemní lano, rozdíl je pouze v umístění a to několik kilometrů od rozvoden. Tyto výběhová lana zajišťují primárně ochranu rozvoden při úderu blesku v blízkosti rozvodny, než ochranu samotného vedení. [4]

3.3 Svodiče přepětí

Svodiče přepětí se připojují vždy paralelně k chráněnému zařízení. Jejich úkolem je zajistit, aby na zařízeních nevzniklo napětí vyšší než dovolené. Společným znakem všech svodičů je však změna impedance s nabývajícím napětím. Při jmenovitém napětí U_n má svodič mezi hroty izolační odpor cca stovky $M\Omega \sim \infty$. Při vzniku přepětí intenzita el. pole překročí el. pevnost vzduchu, která je mezi hroty a vznikne elektrický oblouk. Jeden z hrotů uzemníme, aby se následné přepětí nešířilo dále po vedení, ale do země. Tím, že jeden z hrotů uzemníme, dochází k průchodu tzv. následného proudu po odeznění přepětí, protože oblouk se sám neuhasí a po tuto dobu prochází do země následný proud. Tento proud je třeba omezit na minimum, a proto se svodiče uzemňují přes odpor nebo se upraví jejich konstrukční provedení, aby jejich funkce byla samozhášecí. [2]

3.4 Ochranné jiskřiště

Též také nazývané hrotové, koordinační jiskřiště. Všechny tyto názvy jiskřiště znamenají to samé a jsou to nejjednodušší svodiče přepětí. Ochranné jiskřiště se například umísťuje k izolátoru a zabráňuje zničení jeho povrchu vlivem tepelných účinků oblouku. Princip užití, výhody a nevýhody jsme si popsali v kapitole 2.2.3 Jiskřiště. [2] [4] [8] [19]



Obr. 18: Ochranné jiskřiště [2]

3.5 Bleskojistky

Bleskojistka je zjednodušeně vylepšené jiskřiště, které dokáže samo zhasnout elektrický oblouk oproti jiskřišti. Nedochází zde k hlavnímu nežádoucímu účinku - odpojení vedení od napětí, aby byl oblouk přerušen. Odpor bleskojistky by měl být při vysokém napětí malý a naopak při nízkém napětí (jmenovité napětí) velký. Bleskojistky

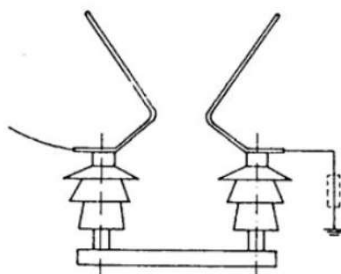
mohou být navíc naplněny vzácnými plyny, které vylepšují vlastnosti bleskojistky. Těmi jsou například výborné svodové schopnosti - až 100 kA při zkušební vlně (10/350), velmi malá kapacita, vysoký izolační odpor ($>1000\text{M}\Omega$). Při výrobě moderních výkonových bleskojistek se aplikují speciální dilatační slitiny, které zajistí odolnost proti vysokým teplotám a extrémním tlakům v plynu při proudech až 100 kA. Výhodou bleskojistek plněných plynem je hlavně jejich dlouhá životnost a stabilita parametrů. [2] [9] [20]



Obr. 19: Bleskojistka [9]

3.5.1 Růžková bleskojistka

Nejjednodušší bleskojistkou je tzv. růžková bleskojistka, která je charakteristická dvěma kovovými vývody (růžky) do tvaru písmena V. Jeden vývod je připojen k vedení a druhý je uzemněný. Při vzniku oblouku je následné zhasení prováděno prodlužováním na oddalující konce vývodů. Tyto bleskojistky můžeme nejčastěji zpozorovat na sloupech pro trolejové vedení a všeobecně v trakci, nebo jako záložní ochrana s dokonalejším svodičem přepětí. To z důvodu velmi malé vypínací schopnosti a závislosti elektrické pevnosti na počasí. [2] [4]

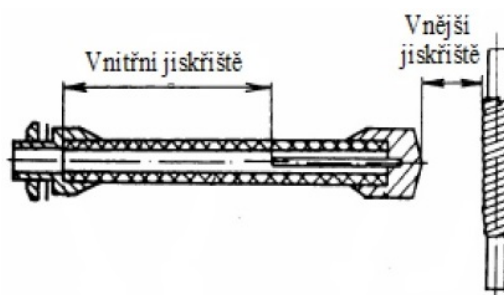


Obr. 20: Růžková bleskojistka [2]

3.5.2 Vyfukovací bleskojistka

Vyfukovací bleskojistka, též také nazývaná Torokova trubice je svodič přepětí s pevným hasivem. Tím je zvětšena vypínací schopnost bleskojistky.

Skládá se ze dvou jiskřišť spojených do série. Jedno jiskřiště je umístěno uvnitř uzavřené trubice ze speciální směsi tvrzené pryže nebo fibru a slouží jako zhášedlo elektrického oblouku. Druhé (vnější) jiskřiště slouží jako odpojovač. Po vzniku přepětí se zapálí obě jiskřiště. Oblouk ve vnitřním jiskřišti v uzavřené trubce žářem odpařuje část obalu, přičemž vzniká plyn tvořený materiálem trubky a neionizovanou vodní párou z absorbované vody. Vytvořený plyn zchladí oblouk a neionizuje okolí oblouku. Oblouk poté ztratí energii a při průchodu harmonického průchodu nulou oblouk vyfoukne plyny ven a zhasne. Takové zhášení oblouku způsobuje velkou závislost strmostí zotaveného napětí a velikost procházejícího proudu bleskojistkou. S tím souvisí životnost bleskojistky, protože dochází k degradaci plynotvorné látky. Bleskojistka vydrží 20 až 30 výbojů, poté je nutné bleskojistku vyměnit. Dnes se tyto bleskojistky neaplikují ani nevyrábějí kvůli jejich vypínací schopnosti, životnosti a schopnosti svést jednu, maximálně pár přepětových vln. [2] [4] [5]

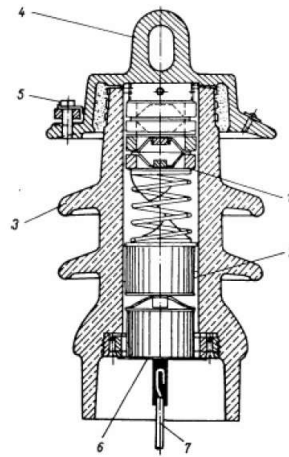


Obr. 21: Vyfukovací bleskojistka [2]

3.5.3 Ventilová bleskojistka

Je nejlepší variantou a nejpoužívanější bleskojistkou. Její široké využití se uplatnilo hlavně díky vysoké spolehlivosti a vylepšeným vlastnostem oproti předešlým bleskojistkám. Struktura je tvořena jiskřištěm (1) a odporovými nelineárními kotouči (2) z pórovitého materiálu (karbid křemíku, sorbit). Jeden odporový kotouč je dimenzován na jmenovité napětí 3 kV, pro vyšší napětí se kotouče zapojují do série, pár desetin milimetru od sebe. Tyto části jsou uloženy v porcelánovém plášti (3), který je naplněný tzv. suchým vzduchem. Tím je jiskřiště chráněno před vlhkostí vzduchu a nemění zapalovací napětí

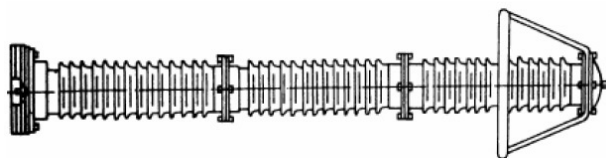
v důsledku nevznikající koroze. Na vrchu porcelánového pouzdra se nachází hliníková čapka (4) se závěsným okem a šroub (5) pro připojení přívodního lana. Ve spod je plášť uzavřen dnem (6), od kterého vede uzemňovací vodič (7). [2]



Obr. 22: Ventilová bleskojistka [2]

Při výboji a vzniku přepětí na svorkách bleskojistky dochází k zapálení jiskřiště a odporovými kotouči prochází proud do země. Jelikož se jedná o nelineární odpory, platí, že čím vyšší je přepětí, tím nižší je odpor kotoučů a tím pádem větší proud procházející do země. Odpor kotoučů musí být natolik velký, aby proud, který prochází do země, byl natolik malý, aby se v jiskřišti přerušil při průchodu proudu nulou. Po tomto jevu, kdy se přeruší průchod proudu, dochází k odpojení kotoučů od napětí, tím se přeruší průchod proudu do země. Proto tato bleskojistka působí jako ventil, který se otevře při nebezpečném přepětí bez časového zpoždění a uzavře průchod jmenovitému proud do země. [2]

Při extrémním zatížení se dno bleskojistky samočinně odtrhne a obsah vysype. [2]



Obr. 23: Ventilová bleskojistka se stínícími kruhy pro napětí > 100 kV (pootočeno o 90°doprava) [2]

3.5.4 Průrazka

Jedná se o tzv. průraznou bleskojistku, která má elektrody od sebe odděleny perforovanými izolačními vložkami. Ty se při vyšším napětí, než je průrazné napětí, trvale svaří, a tím se vytvoří spojení se zemí. Používají se nejčastěji v prostorách ohrožených trakčním vedením, kde může dojít k výskytu nebezpečného dotykového napětí. [2] [24]

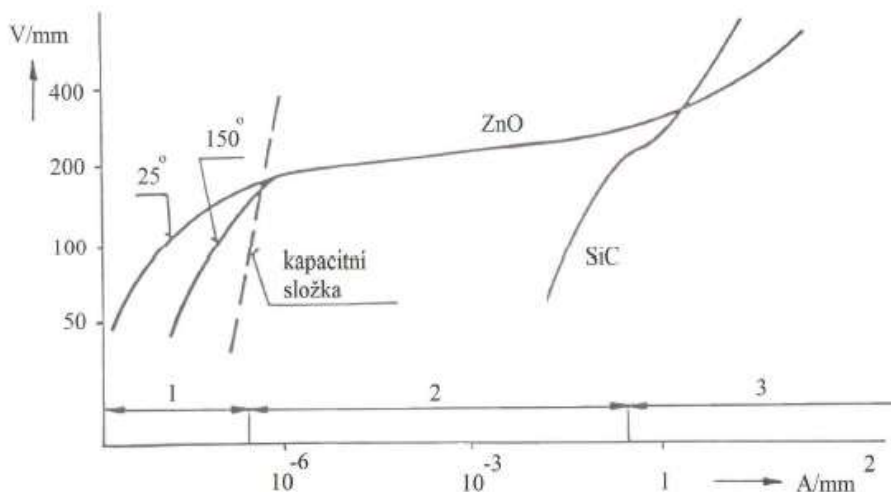
3.6 Kapacita jako přepětová ochrana

Ochránit zařízení proti přepětí přicházejícím po vedení lze užitím kapacity, na které nemůže dojít ke skokové změně napětí. Pokud se kapacita umístí paralelně k chráněnému zařízení, vzroste nebezpečné napětí jedině tehdy, pokud energie přepětí je stejná s energií kapacity. Jestliže taková situace nastane, kapacita nezabrání vzniku přepětí, ale alespoň zajistí snížení strmosti nárůstu napětí vlivem spotřebování výkonu ke svému nabití na vyšší napětí. Nevýhodou je omezené použití pouze na místech, kde se vyskytují přepětí o malé energii. Nejvhodnější užití kapacity jako přepětové ochrany je užití souběžně s bleskojistkou, protože kapacita je schopna snižovat strmost nárůstu přepětí a tím zlepšuje ochranné vlastnosti bleskojistky. [2] [4]

3.7 Omezovače přepětí

Omezovače přepětí jsou nejnovějším a nejpoužívanějším trendem v ochraně proti přepětí v sítích vn, vvn a zvn. Nahrazují postupně všechny zatím užívané ventilové a vyfukovací bleskojistky, nejen při nové výstavbě, ale i při rekonstrukci stávajícího vedení, kde se ještě nacházejí. Výhod, proč se dnes užívají už jen omezovače přepětí je několik. [2] [4] [5] [23] [25]

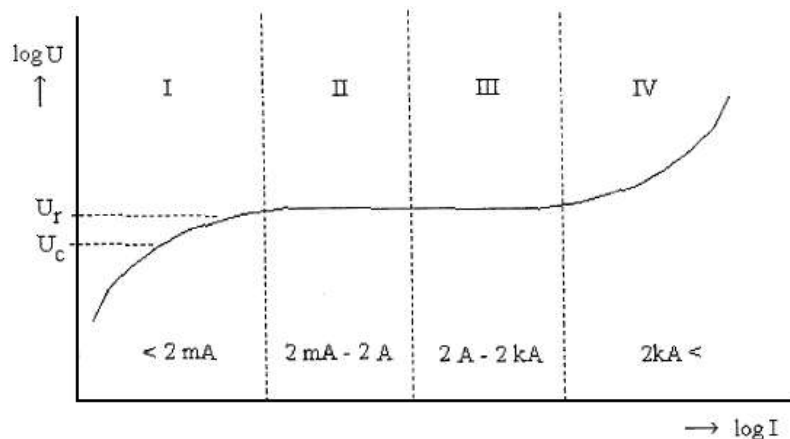
- použití nelineárních odporů ZnO
- bezjiskřišťová struktura (pokud u bleskojistky nezhasl proud při prvním průchodu nulou, bloky SiC nevydrželi další absorpci tep. energie a explodovali)
- není choulostivý na otřesy při přepravě jako bleskojistka
- hmotnost omezovače až o 50% pro nižší napětové hladiny
- při kontrole omezovače netřeba odpojovat od napětí
- velká nelinearita V-A charakteristiky (*Obr. 24*)



Obr. 24: Porovnání V-A charakteristiky ZnO omezovače a SiC svodiče [5]

Tím, že u omezovačů jsou použity napětově závislé odpory kysličníku zinečnatého - ZnO s nelineární V-A charakteristikou (Obr.25), jsou schopny omezit následný proud po odeznění napětí i bez použití zapalovacích jiskřišť. V-A charakteristika je popsána vztahem: $I = k \cdot U^\alpha$

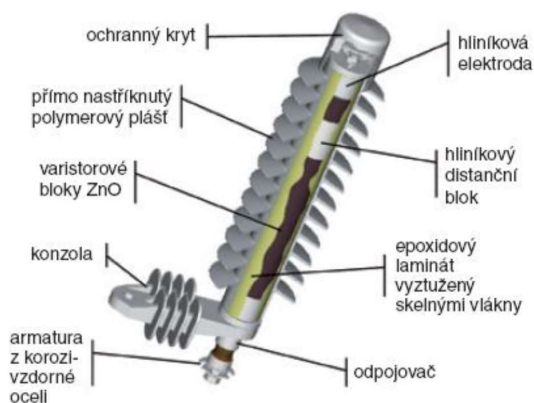
Exponent α nabývá hodnot 4 až 50. Konstanta k odpovídá napětové úrovni, pro kterou je svodič určen. To, že u omezovačů nejsou potřeba zapalovací jiskřiště je způsobeno právě odporem kysličníku zinečnatého, protože při napětí o 10 % nižším, než je jmenovité zbytkové napětí při proudu 10 kA, protéká odporem proud o tři řády nižší, než odporem SiC. Tím je omezovač ZnO nezávislý na strmosti přepětí.



Obr. 25: V-A charakteristika omezovače přepětí [2]

Volt-ampérovou charakteristiku lze rozdělit do 4 částí. V každé části bude nabývat různých proudů a hodnot exponentu α . První část charakteristiky odpovídá proudům do 2 mA a α zde nabývá hodnot 4 až 8. Tato část vyjadřuje trvalé provozní napětí a jmenovité napětí omezovače. Druhá část V-A charakteristiky vyjadřuje dočasné přepětí. V této části exponent α nabývá hodnot 15 až 25 a proudy se zde pohybují od 2 mA do 2 A. V okolí inflexního bodu, tedy část, kde je nelinearita největší, se exponent pohybuje okolo hodnoty 50. Třetí část vyjadřuje spínací přepětí s proudy od 2 A do 2 kA a α je v rozmezí 15 až 25. Poslední čtvrtá část odpovídá atmosférickému přepětí s proudy nad 2 kA a α se zde pohybuje v rozmezí od 7 do 10. Části I a II volt-ampérové charakteristiky se měří stejnosměrným nebo střídavým napětím. Část III a IV se měří pomocí impulzů proudových či napětových generátorů. [2] [4] [5] [23] [25]

Velikost odporů ZnO je závislá na napětí, ale také na teplotě, protože dlouhodobé zvýšení napětí způsobí nárůst proudu z důvodu poklesu odporu a tím se zvýší teplota. Toto teplo je třeba dostatečně odvádět, jinak dochází k tepelné nestabilitě a v extrémních případech až k poškození omezovače. Proto jsou omezovače navrhovány podle určitých parametrů, díky kterým jsou ideálně dimenzovány. [2] [4] [5] [23] [25]



Obr. 26: Omezovač přepětí [2]

Parametry, podle kterých se navrhuje omezovače, jsou *trvalé provozní napětí* U_c a *jmenovité napětí omezovače* U_R . Parametr U_c představuje nejvyšší hodnotu napětí, která je připojena na svorky omezovače při síťové frekvenci. Parametr U_R určuje nejvyšší efektivní hodnotu napětí síťové frekvence, na kterou je omezovač konstruován při zachování správné funkce v podmínkách krátkodobého přepětí. Napětí U_R je definováno jako napětí, kdy je omezovač po dobu 10 sekund vystaven předchozímu namáhání. Poměr napětí U_c a U_R bývá cca 0,8. [2] [4] [5] [23] [25]

To aby omezovač zvládal schopně omezovat přepětí je ovlivněno energetickými pochody, ke kterým dochází při zapůsobení svodiče. Tím, že svádí napětí, se omezovač zahřívá, ale odvod tepla je udáván s podstatně delší časovou konstantou, než po kterou trvá přepětí (až jednotky hodin). Proto o tom, zdali dojde k havárii omezovače, či nikoliv, rozhoduje jeho tepelná kapacita. [2] [4] [5] [23] [25]

3.7.1 Volba energetické třídy

Energetická třída se určuje u omezovačů a značí nám jak velkou energii atmosférických a spínacích přepětí jsou schopni absorbovat, aniž by degradovali nebo došlo ke ztrátě tepelné stability při provozním napětí. Určuje se na základě předepsaných zkoušek a udává se v kilojoulech na kilovolt. Platí: čím vyšší třída, tím je větší energetická kapacita. Protože energii, kterou musí omezovač absorbovat při omezení přepětí, roste s napětím sítě. Omezovače jsou rozděleny celkem do 5 energetických tříd. Omezovače třídy 2, 3 jsou využívány v sítích 110 kV, omezovače třídy 3 a 4 v sítích 220 kV a síti 400 kV, nejvíce jsou používány omezovače 3,4 a 5. [2] [8]

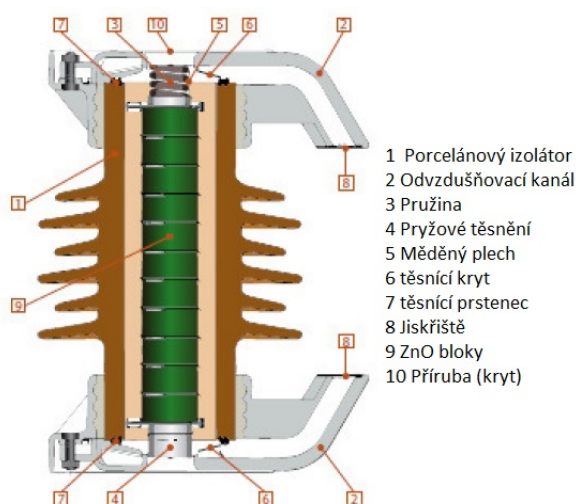
Typ omezovače	Energetická třída	Absorbovaná energie kJ/kV	Rozsah provozního napětí
EXLIM R	2	5.0	≤ 170 kV
PEXLIM R	2	5.1	≤ 170 kV
EXLIM Q	3	7.8	170 – 420 kV
-PEXLIM Q	3	7.8	170 – 420 kV
EXLIM P	4	10.8	362 – 550 kV
PEXLIM P	4	12	362 – 550 kV
HS PEXLIM P	4	10.5	362 – 550 kV
EXLIM T	5	15.4	420 – 800 kV
HS PEXLIM T	5	15.4	420 – 800 kV

Tab. 5: Parametry omezovačů přepětí ABB a názorné zobrazení energetických tříd [4]

3.7.2 Porcelánový omezovač ZnO

Porcelánové omezovače jsou jako každý omezovač sestaveny z jedné nebo více jednotek, které obsahují sloupec bloků ZnO. Základem je, jak z názvu vyplývá, porcelánová jednotka na které jsou na obou koncích nasazené příruby. Zatěsnění se provádí pomocí pryžového těsnění s předpjatým nerezovým plechem. Při nárůstu ionizovaných plynů uvnitř těla dochází k zvyšování tlaku. Tento tlak redukuje těsnicí desky

na obou koncích. Plyn se odvádí přes odvodušňovací kanálky, které směřují k sobě. Tato technologie opatření zabraňuje tříštivé destrukci izolátoru. Oproti silikonovým omezovačům mají podstatně vyšší hmotnost, s tím související horší manipulaci a vyšší cenu ve srovnání s alternativním silikonovým omezovačem. Avšak jsou používány pro aplikace s vysokými nároky na mechanickou pevnost a také v prostředích s extrémními klimatickými podmínkami, kde není možné silikonové omezovače použít. [4] [21] [23] [25]

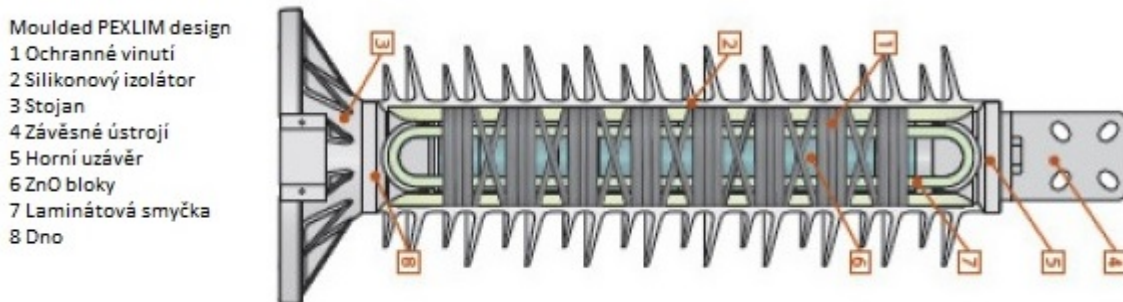


Obr. 27: Řez porcelánového omezovače s jiskřištěm [4]

3.7.3 Silikonový omezovač ZnO

Základním rozdílem je zde využité silikonové pouzdro omezovače, které vykazuje velmi dobré vlastnosti v ohledu nízké hmotnosti, oproti porcelánovým pouzdrům omezovačů, dále omezení znečišťování, odolnost proti UV záření a flexibilitu v konstrukci. Konstrukce jednotlivých modulů má vysokou mechanickou pevnost a zkratovou odolnost. Omezovače se silikonovým pouzdrům nemají vzduchové mezery ani dutinky, protože zde vznikají minimální vnitřní výboje. Při průtoku zkratového proudu nedochází k roztržení omezovače, ale k roztavení silikonu.

Pokud jsou kladeny vysoké požadavky na mechanickou odolnost, používá se trubková konstrukce, která má podobnou pevnost jako porcelánová konstrukce, s tím rozdílem, že je mnohem lehčí. Zde jsou už konce jednotek zatěsněny pryžovým těsněním a vybaveny odvodušňovacími kanálky. Základem je trubka ze skelného vlákna s navulkanizovanými silikonovými domky. [4][21][25]



Obr. 28: Řez silikonového omezovače

4 Simulace přepětové ochrany

Stěžejním a zároveň nejpřínosnějším bodem této práce je pokusit se vytvořit počítačový model ve zvoleném programu, na kterém lze ověřit teoretické předpoklady uvedené v předchozích kapitolách.

Prvním krokem bylo zvolení vhodného **programu** pro simulaci, dále vytvoření základního **přenosového vedení**, poté vytvoření **bleskového výboje** dle známých parametrů a nakonec dimenzování **přepětové ochrany** proti bleskovým výbojům.

4.1 MATLAB-Simulink

Pro vytvoření počítačového modelu a následnou simulaci jsem si vybral program MATLAB, který mi byl v podvědomí neznámější a nejsympatičtější, i přes to, že jsem ho doposud často nevyužíval dobrovolně. MATLAB je program vhodný pro vědeckotechnické výpočty, modelování, simulace, měření a zpracování signálů. V MATLABu jsem využil prostředí Simulink, kde lze vhodně sestavit model vedení a nakonfigurovat parametry.

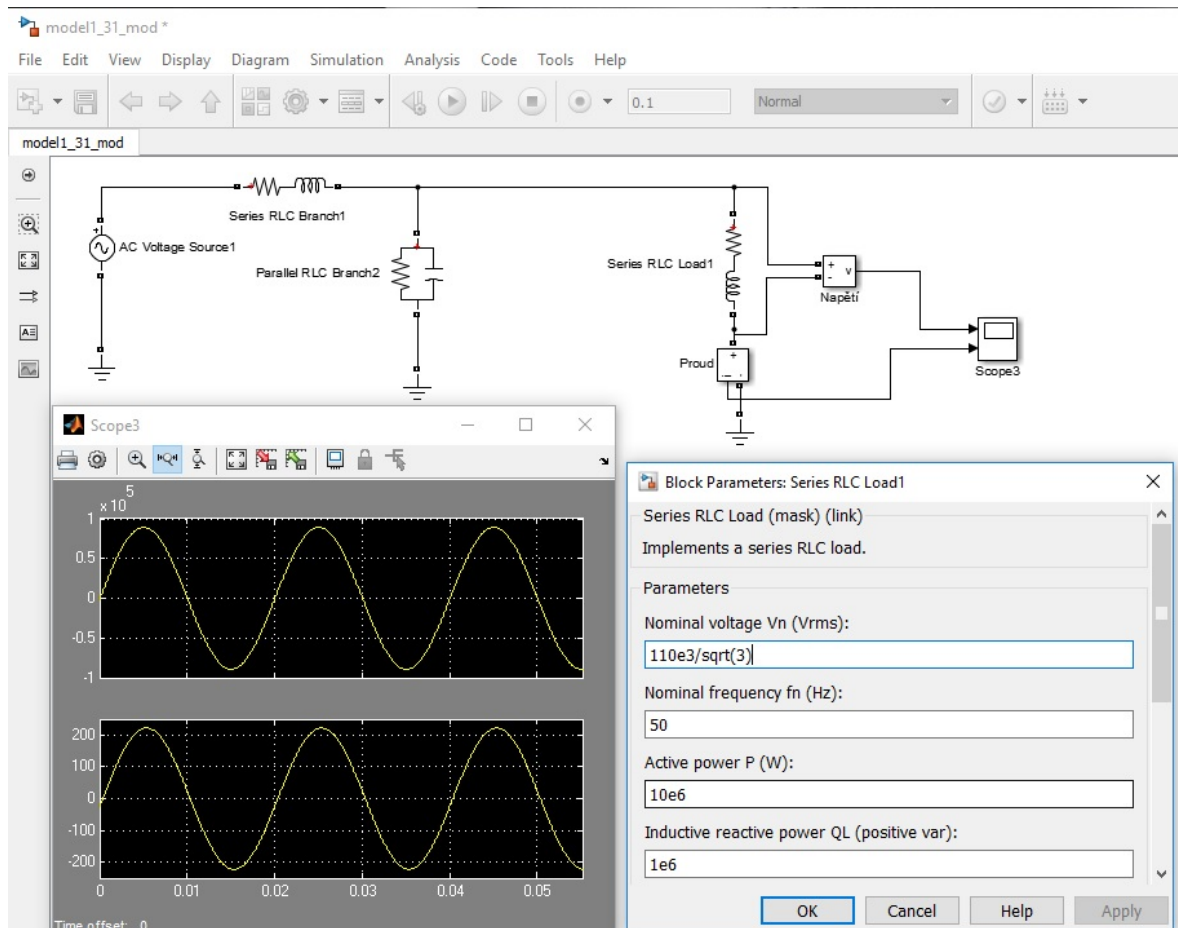
4.2 Přenosové vedení vn

V prostředí simulink library bylo prvním krokem vyhledat rozšíření, které bude splňovat moje představy pro stavbu vedení, jeho konfiguraci parametrů a samozřejmě vyhodnocení. Nachází se zde rozšíření programu Simulink zvané Simscape, které je zaměřené na tvorbu fyzikálních modelů a simulaci multifyzikálních systémů. Toto rozšíření obsahuje knihovny elektrických, mechanických, hydraulických, výkonových bloků, s kterými lze pracovat.

V našem případě si vystačíme pouze s bloky výkonovými, ty jsou pro nás důležité.

Cílem bude namodelovat jednoduché 1f vedení pro přehlednost o jmenovité hodnotě 110 kV, vzdálenosti například 20 km s induktivní RL zátěží na konci vedení. Bloky nalezneme v knihovně Simscape>SimPowerSystems>Specialized Technology. Pro sestavení budeme potřebovat střídavý zdroj napětí, zátěž a sériové/paralelní větve. Většinu najdeme v bloku Elements. Použil jsem Series RLC Branch, Series RLC Load, Parallel RLC Branch a Ground. Střídavý zdroj napětí se nachází v bloku Electrical Sources.

Součásti jsou pospojovány podle náhradního schématu vedení. Parametry zdroje, vedení a zátěže jsem volil podle reálných hodnot vyskytujících se v praxi. V simulaci uvažujeme vedení, kde vodiče jsou holé, materiál AlFe, 6 vodičový, jmenovitý průřez 300 mm² – to odpovídá hodnotám 0,1 Ω/km, 1 mH/km, 10⁹ Ω/km. Zátěž je též zvolena pouze přibližně dle parametrů odpovídajícím skutečnosti: P = 10 MW, Q = 1 MVar.

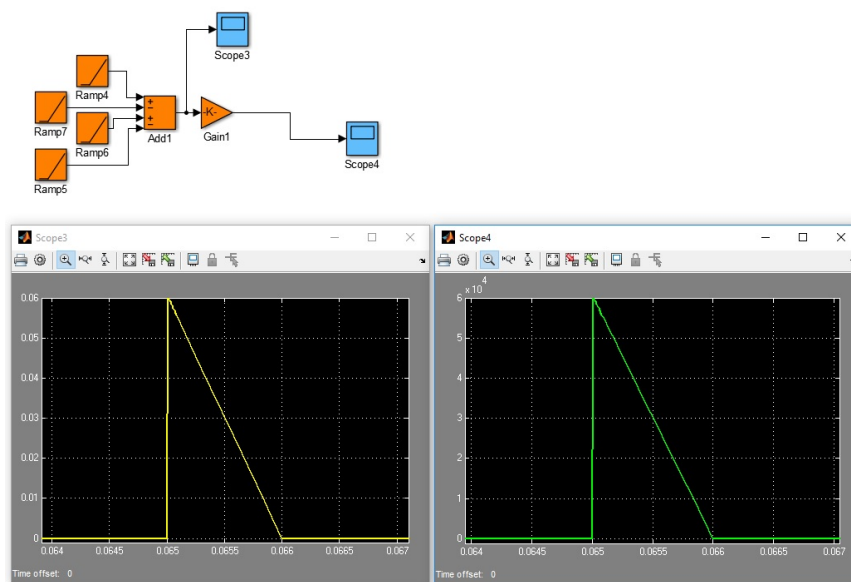


Obr. 29: Náhradní schéma vedení a zátěže se zobrazením průběhu napětí a proudu

Pro ověření funkčnosti a výsledného signálu připojíme k zátěži ampérmetr a voltmetr s osciloskopem, který nám ukáže průběh napětí a proudu.

4.3 Bleskový výboj

Poté, co jsem sestrojil vedení, potřebujeme vytvořit bleskový impuls, který zasáhne fázový vodič v určitém čase a bude mít parametry obdobné, co skutečný výboj blesku. Zkušební napěťový impuls má parametr $1,2 \mu\text{s}$ - doba trvání čela a $50 \mu\text{s}$ - doba trvání půltýlu. Přepětový impuls lze nasimulovat určitě více způsoby. Pro simulaci jsem použil bloky Ramp v Simulinku, kterými jsem vytvořil náběžnou hranu trvající od 0 do $1,2 \mu\text{s}$ a sestupnou hradu trvající $50 \mu\text{s}$. Tím jsem vytvořil tvar s odpovídající dobou trvání. Teď je důležité napěťovému skoku přiřadit odpovídající hodnotu, amplitudu skoku, která bude vyjadřovat reálný blesk. Pro představu jsem zvolil 60 kV . Toho docílíme tak, že signál vynásobíme funkčním blokem Gain. Zesílení nastavíme na $1e6$, protože výstupní amplituda signálu ze součtu Ramp je $0,06$.

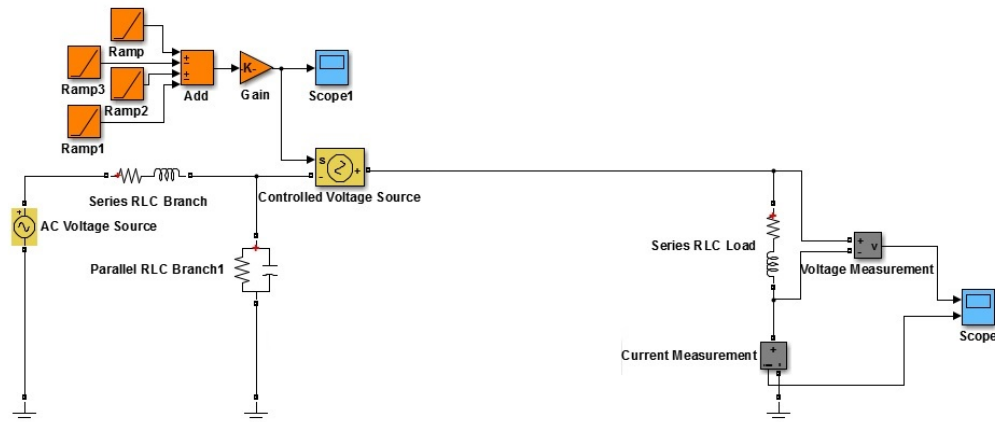


Obr. 30: Napěťový skok před (žluté) a po zesílení (zelené)

4.4 Propojení Simulink a Simscape

V bodě, kdy máme hotové obě části (vedení, napěťový skok) nastává potíž s propojením bloků ze Simulinku a bloků z knihovny Simscape. K tomuto účelu by měl sloužit pravděpodobně blok v knihovně Simscape zvaný PS-Simulink Convertor a naopak Simulink-PS Convertor. Bohužel se mi nepodařilo přijít na správné zapojení a nastavení, tudíž jsem od tohoto nápadu musel ustoupit. Avšak tento problém lze vyřešit blokem Controlled Voltage Source, který se nachází pod Simscapem.

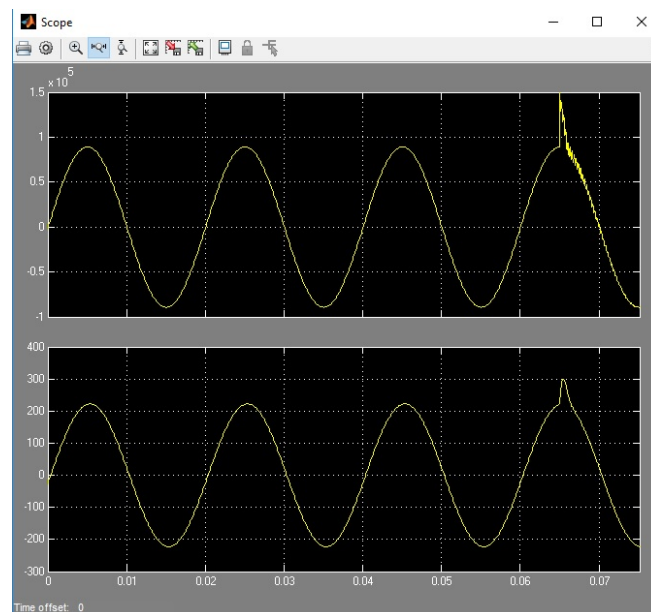
Princip tohoto bloku je ten, že můžeme přivést libovolný signál ze Simulinku do bloku a celý blok Controlled Voltage Source použít jako zdroj s uvedeným signálem. Zapojení znázorňuje *obr. 30*.



Obr. 31: Propojení napěťového skoku (modré) a vedení pomocí Controlled Voltage Source

Po spuštění a výpočtu simulace zjistíme z osciloskopu na zátěži, že by bylo vhodné napěťový skok přivést v čase, kdy napětí na zátěži dosahuje největší amplitudy z důvodu vhodného znázornění ukázky omezovače přepětí a hlavně v tomto bodě je přepětí nejrizikovější. Pokud by napěťový skok trvající cca max 100 μ s přišel v čase, kdy průběh napětí ze střídavého zdroje napětí prochází nulou, jeho následky by byly pro připojenou zátěž minimální a omezovač by v tomto případě nezareagoval.

Abychom tak učinili, stačí upravit všechny časy ramp, aby nezačínaly v čase 0, ale nastavit je tam, kde je maximální amplituda signálu na zátěži (*Obr. 31*).



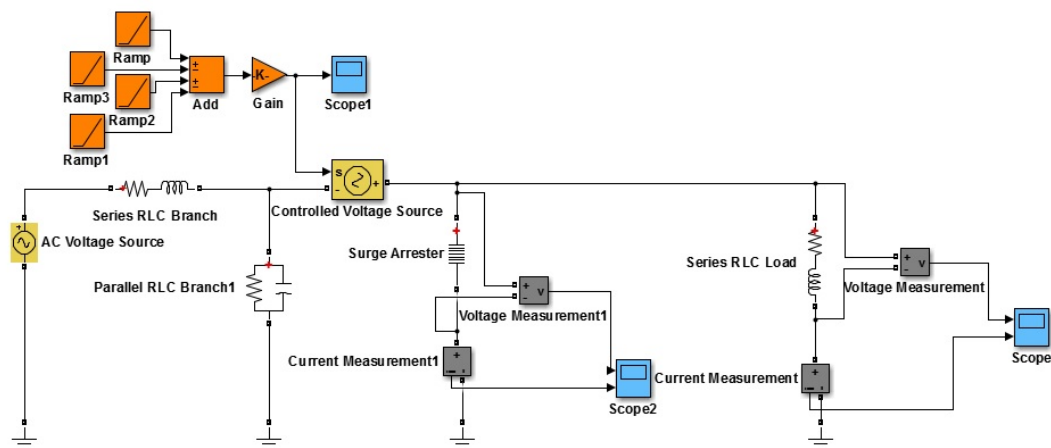
Obr. 32: Působení napěťového impulsu 60kV v čase 65ms

4.5 Dimenzování přepětové ochrany

Nyní máme vše dokonale připravené pro závěrečnou část simulace. V knihovně Simscape se nachází blok nazvaný Surge Arrester, který implementujeme do obvodu. Přepětovou ochranu připojujeme vždy paralelně k chráněnému zařízení a co možná nejbližše. Výsledné zapojení přepětové ochrany znázorňuje *obr. 36*. Tento blok nám umožňuje nastavit referenční napětí a proud, počet bloků odporníku ZnO a konstanty k a α 1-3. Pro pochopení, je vhodné otevřít nápovědu, kde nalezneme vysvětlení, co tento blok představuje, na jakém principu funguje a co dané veličiny znamenají.

Blok Surge Arrester je omezovač přepětí, který se skládá z nelineárních odporů na bázi oxidu zinečnatého. Pro tento blok je určena rovnice (4.5), kde figurují všechny veličiny a jsou pro ni znázorněny grafy (VA charakteristiky), které vyjadřují působení nelineárních odporů při změně napětí.

$$\frac{V}{V_{REF}} = k \left(\frac{I}{I_{REF}} \right)^{\frac{1}{\alpha i}} \quad (4.3)$$

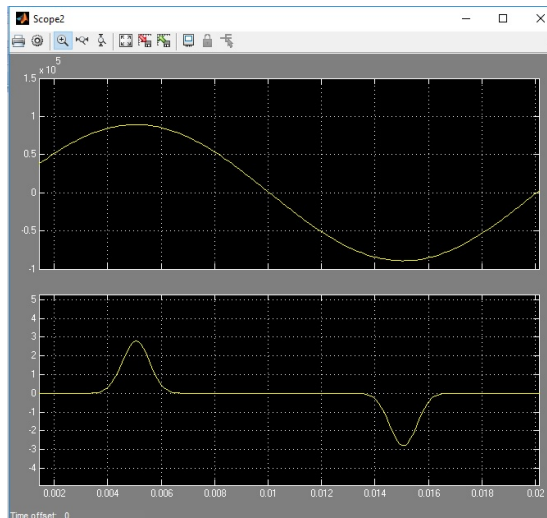


Obr. 33: Celkové zapojení vedení s přepětovou ochranou a přepětovým impulsem

Abychom vhodně nastavili přepětovou ochranu a tudíž všechny obsažené parametry, je nejsnazší pro představu vytvořit skript v Matlabu, v kterém figuruje vzorec popisující přepětovou ochranu. Necháme si vykreslit graf, v kterém vidíme projevení změn k a α (Obr. 36). Jako referenční napětí jsem zvolil 99.5 kV, referenční proud 28 A na jeden blok odporníku ZnO. Další hodnoty jako jsou k a α 1-3 jsem ladil podle grafu v skriptu Matlabu a hlavně podle výstupních parametrů na ZnO. Při nastavení jsem se řídit několika podmínkami, na které je třeba dbát.

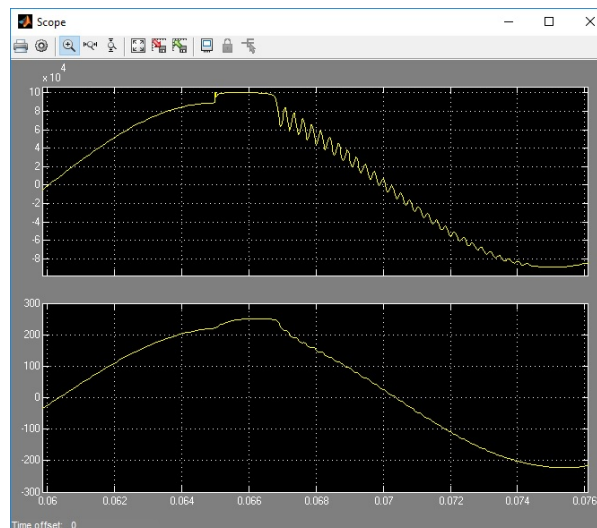
- minimalizovat procházející proud omezovačem přepětí, při klidovém stavu vedení
- co nejefektivněji omezit přepětový impuls
- sledovat procházející proud omezovačem přepětí při přepětové špičce

Při klidovém stavu, kdy na vedení nevzniká přepětí, by protékající proud omezovačem přepětí měl být ideálně 0 A. V mém případě se jedná o 1ky ampér, konkrétně $\pm 2,75$ A (Obr. 32).



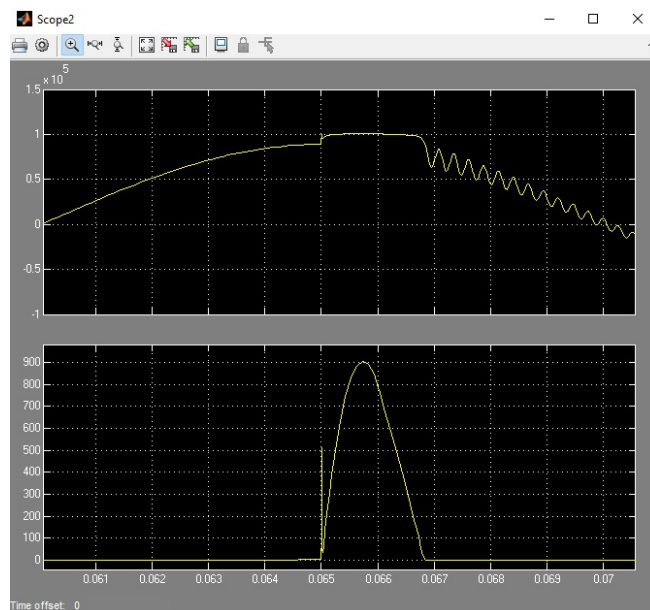
Obr. 34: Napětí a proud omezovačem v normálním stavu

Proud, který odebírá zátěž bez omezovače, je cca 222 A. Přepětí způsobí nárůst napětí o 60 kV, efektivní hodnota napětí na zátěži je cca 89,3 kV, tedy celkové maximální napětí, které vznikne při přepětí je 149,3 kV (Obr. 31). Při připojení nastavené přepětové ochrany je vidět, že napětí na zátěži bylo úspěšně omezeno na 100,5 kV ef a proud se při této přechodové změně zvýšil na cca 250 A z 222 A (Obr. 33).



Obr. 35: Omezení přepětí na zátěži na 100,5 kV z 149,3 kV

Proud, který odvedl omezovač přepětí, při přesáhnutí nastaveného referenčního napětí je přibližně 904 A (Obr. 34).



Obr. 36: Nárůst proudu svedeného omezovačem do země při přepětí.

Závěr

Tato práce se zabývá teoretickou a posléze praktickou částí. V teoretické části práce je vysvětleno a popsáno rozdělení druhů přepětí, které ovlivňují provoz a přenos elektrické energie od dodavatele až ke spotřebiteli. S tím ohledem, že přednostně se tato práce zabývá atmosférickým přepětím, které vzniká po výboji blesku do vedení, nebo v blízkosti vedení. A také spínacím přepětím, které je charakteristické spínáním spotřebičů (všeobecně zátěží), anebo vypínáním zkratů na vedení.

Poté následuje teoretický výčet přepětových ochran užívaných pro síť nízkého napětí. U každé přepětové ochrany je stručně vysvětlen princip, funkce a aplikace. V závěru této kapitoly je vzájemné porovnání prvků, aby čtenář dostatečně pochopil způsob instalace, která je odvozena od jejich parametrů.

Třetí kapitola je zaměřena na prvky omezující přepětí většinou na distribučních sítích, tedy sítích vn, vvn nebo zvn. Zde je shrnut výčet od nejstarších užívaných ochran, které se dnes už nepoužívají, až po nejnovější aplikované zařízení, které běžně vidáme na sloupech vedení, a jsou spolehlivou ochranou převážně při vzniku atmosférického výboje, protože dosahuje výrazně vyšších hodnot než spínací přepětí.

Praktická část má ověřit nejen pochopení principu přepětové ochrany, ale i vhodnou aplikaci, která dokáže, že způsobené náhlé přepětí bude opravdu omezeno. Smyslem je tuto skutečnost ověřit v simulačním programu na vytvořeném modelu, který ve zjednodušených případech odpovídá skutečnosti. Výsledkem je splnění teoretických předpokladů, kdy vzniklá přepětová vlna na vedení je svedena omezovačem přepětí a na zátěži je v mezích normy zvýšené napětí a proud, tak aby nedošlo k destrukci připojeného zařízení.

Jelikož je téma této bakalářské práce velice široké a obsahem přesahuje rozsah kvalifikační práce, lze uvážit, že se tímto tématem mohou zabývat případně i v následující diplomové práci. Ta může být obohacena nejen o nové trendy a detailnějším popisem výroby omezovačů přepětí, ale i reálným měřením a zkoušením izolátorů. Nebo vytvořením dalších simulačních modelů, ať už v jiných programech, nebo vytvořením jiných modelů. U kterých odzkoušet různé změny vedení, změny přepětových impulsů a ty následně porovnat.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BURANT, Jiří. *Blesk a přepětí: systémová řešení ochran*. Praha: FCC Public, 2006. ISBN 80-865-3410-3.
- [2] JAROŠ, Tomáš. *Ochrany energetických sítí proti přepětí*. Plzeň, 2010. Diplomová práce. ZČU.
- [3] *Extrémní meteorologické jevy* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/klimaticke-zmeny/extremni-meteorologicke-jevy.htm>
- [4] BENETKA, Tomáš. *Ochrana sítí NN, VN, VVN proti přepětí*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZČU.
- [5] MALÝ, Jiří. *Přepětí v sítích vysokého napětí*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. ZČU.
- [6] SLEZÁK, Rudolf. *Návrh zabezpečení slaboproudých zařízení proti účinkům přepětí*. Zlín, 2013. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [7] KNEBL, Jan. *Aplikace přepěťových ochran v sítích NN*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] ČESKÁ ENERGETICKÁ SPOLEČNOST. *OCHRANA DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ NN, VN A 110 KV PŘED PŘEPĚTÍM: výtah z norem PNE 33 0000-7, PNE 33 0000-8 a PNE 33 0000-9*. Praha, 2010.
- [9] SCHRACK. *Svodiče bleskových proudů a přepětí*. Katalog PDF
- [10] HAKEL. *Průvodce problematikou přepětí, průvodce pro výběr SPD*. Katalog PDF
- [11] *Kulový blesk* [online]. Wikipedia [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kulov%C3%BD_blesk
- [12] ZDARSA, Jaromír. *Sada 1-Elektrotechnika: Přepětí, ochrany před přepětím* [online]. Jihlava, 2013 [cit. 2016-04-23]
- [13] *Soubor norem ČSN EN 62305: Ochrana před bleskem* [online]. 2006 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: http://www.hromosvodnitechnika.cz/dokumenty/dehn/DehnKK09CZ_str123-131_SouborNoremCSNEN62305.pdf
- [14] KASÍK, Pavel. *Bleskům neutečete. Vědci je umí detekovat, vyvolat, ale ne vysvětlit* [online]. In: . 2008 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/bleskum-neutecete-vedci-je-umi-detekovat-vyvolat-ale-ne-vysvetlit-10f-/tec_technika.aspx?c=A080729_183109_tec_technika_pka
- [15] Make Lightning Strike. *Animace vzniku bouřkového mraku, následků při zásahu blesku, vznik blesku* [online]. Nationalgeographic [cit. 2016-04-23]. Dostupné z:

- <http://environment.nationalgeographic.com/environment/natural-disasters/lightning-interactive.html>
- [17] *Encyklopedie fyziky: Zenerova (stabilizační) dioda* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/274-zenerova-stabilizacni-diodahw.cz>
- [18] *Z čeho jsou sestavovány přepětové ochrany* [online]. vyvoj.hw.cz, 2000 [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/z-ceho-jsou-sestavovany-prepetove-ochrany.html>
- [19] Přepětová ochrana. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99ep%C4%9B%C5%A5ov%C3%A1_ochrana#2._Ochrann.C3.A9_jisk.C5.99i.C5.A1t.C4.9B
- [20] Bleskojistka. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Bleskojistka>
- [21] Elpro-Energo. *OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ: PORCELÁNOVÉ OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.elpro-energo.cz/omezovace-prepeti/technicka-data/porcelanove-omezovace/>
- [22] ABB. *Surge arresters: Safe and reliable protection of electrical equipment* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://new.abb.com/high-voltage/surge-arresters>
- [23] Průrazka. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Pr%C5%AFrazka>
- [24] TRPIŠOVSKÝ, Vladimír. ELEKTRO: časopis pro elektroniku. In: *Omezovače přepětí ZnO pro vvn* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/omezovace-prepeti-zno-pro-vvn--14039>

Seznam tabulek

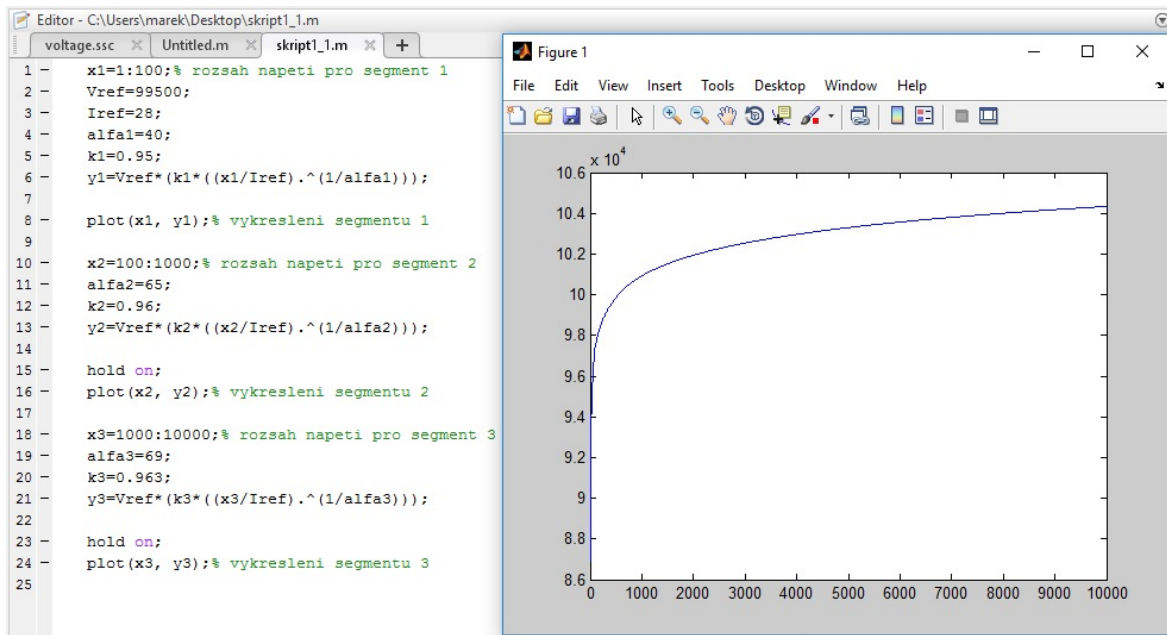
Tabulka 1: Porovnání velikostí napětí, proudů a časů jednotlivých vazeb vznikajících na metalickém vedení nebo vodivých částech stavební konstrukce	[24]
Tabulka 2: Určení vzdálenosti mezi svody	[30]
Tabulka 3: Zóny ochrany před bleskem	[31]
Tabulka 4: Porovnání přepětových ochran pro ochranu nn	[39]
Tabulka 5: Parametry omezovačů přepětí ABB a názorné zobrazení energetických tříd	[49]

Seznam obrázků

Obrázek 1: Elektricky nabitý bouřkový mrak	[17]
Obrázek 2: Izokeraunická mapa počtu bouřkových dnů na území ČR	[18]
Obrázek 3: Porovnání bleskového výboje a aproximačního impulsu 10/350 μ s	[23]
Obrázek 4: Porovnání průběhu zkušebních vln třídy I (10/350) a třídy II (8/20)	[23]
Obrázek 5: Průběh impulsu proudu a impulsu napětí	[24]
Obrázek 6: Způsob uzemnění nulového bodu: a) izolovaný uzel b) nepřímo uzemněný uzel c) uzemněný uzel	[28]
Obrázek 7: Svodič přepětí-jiskřiště do domovního rozvaděče	[34]
Obrázek 8: Pracovní charakteristika jiskřiště před a po omezení úrovně a doby trvání přepětí	[34]
Obrázek 9: Jednoduché uspořádání jiskřiště	[34]
Obrázek 10: Varistor do domovních rozvodů	[35]
Obrázek 11: Řez varistoru a schematická značka	[35]
Obrázek 12: V-A charakteristika varistoru	[36]
Obrázek 13: Omezující charakteristika varistoru	[36]
Obrázek 14: V-A charakteristika supresorové diody	[37]
Obrázek 15: Omezující charakteristika supresorové diody	[37]
Obrázek 16: V-A charakteristika Zenerovy diody	[38]
Obrázek 17: Aplikace zemního lana na vedení, Z-zemní lano, L-fázový vodič, S-poloměr, α -ochranný úhel, h_Z -výška zemního lana, h_L -výška fázového vodiče	[41]
Obrázek 18: Ochranné jiskřiště	[42]
Obrázek 19: Bleskojistka	[43]
Obrázek 20: Růžková bleskojistka	[43]
Obrázek 21: Vyfukovací bleskojistka	[44]
Obrázek 22: Ventilová bleskojistka	[45]
Obrázek 23: Ventilová bleskojistka se stínícími kruhy pro napětí > 100 kV	[45]
Obrázek 24: Porovnání volt-ampérové charakteristiky ZnO omezovače a SiC svodiče	[47]
Obrázek 25: Volt-ampérová charakteristika omezovače přepětí	[47]
Obrázek 26: Omezovač přepětí	[48]
Obrázek 27: Řez porcelánového omezovače s jiskřištěm	[50]
Obrázek 28: Řez silikonového omezovače	[51]
Obrázek 29: Náhradní schéma vedení a zátěže se zobrazením průběhu napětí a proudu	[52]

Obrázek 30: Napětový skok před (žlutá) a po zesílení (zelená)	[53]
Obrázek 31: Propojení napětového skoku (modré) a vedení pomocí Controlled Voltage	[54]
Obrázek 32: Působení napětového impulsu 60 kV v čase 65 ms	[54]
Obrázek 33: Celkové zapojení vedení s přepětovou ochranou a přepětovým impulsem	[55]
Obrázek 34: Napětí a proud omezovačem v normálním stavu	[56]
Obrázek 35: Omezení přepětí na zátěži: z 149,3 kV na 100,5 kV	[56]
Obrázek 36: Nárůst proudu svedeného omezovačem do země při přepětí	[57]

Přílohy



Obr. 37: Užitý skript pro vykreslení grafu