

ČEZ Distribuce, E.ON CZ, E.ON distribuce, ČEPS, ZSE	VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY - OCHRANA PŘED BLESKEM	PNE 33 3160-2
<p>Konečný návrh podnikové normy energetiky pro rozvod elektrické energie odsouhlasily tyto organizace: ČEPS, a.s., ČEZ Distribuce, a.s., E.ON Česká republika, s.r.o., E.ON Distribuce, a.s., a ZSE Bratislava, a.s.</p> <p>Tato norma stanoví podmínky pro ochrany větrných elektráren v distribučních sítích před bleskem.</p> <p>Tato norma má pouze informativní charakter, protože vychází z doporučení IEC (technická zpráva IEC/TR 61400 Větrné elektrárny – Část 24: Ochrana před bleskem (Wind turbine systems – Lightning protection)).</p>		
Návaznost: IEC/TR 61400-24	Účinnost od: 2009-01-01	

Obsah

Strana

Úvod	5
1Předmět normy.....	5
2Definice	5
3Blesk a větrné elektrárny.....	8
3.1 Vlastnosti blesku	8
3.2 Formování bleskového výboje a elektrické parametry	8
3.3 Blesky mrak-země.....	9
3.3.1 Záporné blesky mrak-země.....	9
3.3.2 Kladné blesky mrak-zem.....	12
3.4 Vzestupné vyvolané blesky	13
3.5 Ochrana větrných elektráren proti blesku – základní problém.....	15
3.6 Stávající normy a technické zprávy IEC týkající se ochrany proti blesku	15
4Statistiky o škodách na větrných elektrárnách	17
4.1Data o škodách na větrných elektrárnách způsobených bleskem.....	17
4.2Statistiky škod	17
4.2.1 Četnost škod	17
4.2.2 Poškození specifických součástí VE	18
4.2.3 Velikost VE a doba v provozu	19
4.2.4 Náklady na opravu poškození bleskem.....	21
4.2.5 Vliv na výrobu elektřiny	21
4.2.6 Sezónní rozložení poruch	22
4.3Slabé a silné stránky databáze	24
4.3.1 Všeobecně	24
4.3.2 Dánsko	24
4.3.3 Německo	25
4.3.4 Švédsko	25
4.4Závěry a doporučení	25
4.4.1 Závěry	25
4.4.2 Zlepšení úrovně databáze.....	25
5Výpočet rizika škod způsobených na větrné elektrárně bleskem	25
5.1Úvod.....	25
5.2Ohodnocování četnosti úderu blesku do větrné turbíny	26
5.3 Použití IEC 61024-1-1.....	27
5.4Použití IEC 61662 (IEC 62305-2).....	29
5.5Analýza nákladů na systém ochrany lopatek před bleskem	30
5.6 Analýza nákladů na ochranu řídicího systému VE před bleskem.....	31
6 Ochrana lopatek VE před bleskem.....	32
6.1 Složení lopatek.....	32
6.2 Mechanismus poškození lopatky	33
6.3 Ochrana proti blesku lopatek větrné turbíny.....	34
6.3.1 Základní problém	34
6.3.2 Jímací (bleskosvodové) systémy na povrchu lopatky nebo zabudované v povrchu lopatky	35
6.3.3 Přilnavé kovové pásy a svodové pásy.....	35
6.3.4 Systémy vnitřních bleskosvodných vodičů	35
6.3.5 Vodivé povrchové materiály	35
6.4 Účinnost zachycení.....	35
6.5 Rozměry materiálů.....	36
6.6 Připojení lopatky k ose vrtule	38
6.7 Uhlíkový laminát (CRP).....	38
6.8 Vedení uvnitř lopatek.....	38
7Ochrana ložisek a převodovky	38
7.1 Poškození ložisek AC a DC proudy	38
7.2 Poškození ložisek bleskovými proudy.....	38
7.3 Výzkumy v laboratoři.....	39
7.4 Poškození převodovky.....	39
7.5 Ochrana před bleskem dílů ložisek a převodovek.....	39
8Ochrana elektrické soustavy a systému řízení	41
8.1Úvod.....	41
8.2Uspořádání elektrického zařízení	41
8.3Zóny ochrany před bleskem LPZ	45
8.4 Mechanismy přepětové vazby	47
8.5 Pospojování a stínění	49
8.6 Ochrana přepětovým ochranným zařízením.....	52
8.6.1 Všeobecná ochrana přepětovým ochranným zařízením	52
8.6.2 Ochrana elektrických prvků přepětovým ochranným zařízením.....	52

8.6.3 Ochrana signálních obvodů přepětovým ochranným zařízením	52
8.6.4 Místo instalace přepětového ochranného zařízení	53
8.7 Shrnutí	53
9 Uzemňování	53
9.1 Ochrana před bleskem v rámci uzemňovací soustavy samostatně stojící VE	53
9.1.1 Uspořádání typu A	54
9.1.2 Uspořádání typu B	54
10 Bezpečnost osob	57
10.1 Všeobecně	57
10.1.1 Gondola	57
10.1.2 Stožár	57
10.1.3 Oblast v úrovni země	57
10.1.4 Pokyny pro personál	58
11 Závěry a doporučení	58
Příloha A	59
Dotazník týkající se poškození VE bleskem	59
Příloha B Příklad výpočtu četnosti poruch při úderu blesku do větrné elektrárny	60

Předmluva

Citované normy

ČSN EN 62305-1 Ochrana před bleskem – Část 1: Obecné principy

ČSN EN 62305-2 Ochrana před bleskem - Část 2: Řízení rizika

ČSN EN 62305-3 Ochrana před bleskem - Část 3: Hmotné škody na stavbách a nebezpečí života

ČSN EN 62305-4 Ochrana před bleskem - Část 4: Elektrické a elektronické systémy ve stavbách

ČSN EN 60079-10 Elektrická zařízení pro výbušnou plynnou atmosféru – Část 10: Určování nebezpečných prostorů

ČSN EN 61241-10:2004 Elektrická zařízení pro prostory s hořlavým prachem – Část 10: Zařazování prostorů, kde jsou nebo mohou být hořlavé prachy

ČSN 33 30 60 Ochrana elektrických zařízení před přepětím

ČSN EN 60099-4 Svodiče přepětí. Část 4: Bezjiskříšťové omezovače přepětí pro soustavy se střídavým napětím

ČSN EN 60099-5 Svodiče přepětí. Část 5: Doporučení pro volbu a použití

ČSN 38 0810 Použití ochran před přepětím v silových zařízeních

ČSN EN 60071-1 Elektrotechnické předpisy – Koordinace izolace – Část 1: Definice, principy a pravidla

ČSN EN 60071-2 Elektrotechnické předpisy – Koordinace izolace – Část 2: Pravidla pro použití

ČSN EN IEC 60815 Směrnice pro volbu izolátorů s ohledem na podmínky znečištění

PNE 33 0000-1 Ochrana před úrazem elektrickým proudem v distribučních soustavách a přenosové soustavě

IEC/TR 61400 Větrné elektrárny – Část 24: Ochrana před bleskem (Wind turbine systems – Lightning protection)

Vypracování normy

Zpracovatel: EGÚ Praha, HV laboratory, a.s. Ing. Luboš Kočíš

Pracovník ONS odvětví energetiky: ÚJV Řež, a.s. divize Energoprojekt Praha, Ing. Jaroslav Bárta

Úvod

Během posledních let byly zaznamenány poškození větrných elektráren údery blesku ve zvýšené míře a stávají se nezanedbatelným problémem. Zvyšující se počet a výška větrných elektráren se projevuje ve zvýšeném výskytu poškození větrné elektrárny bleskem více než je přijatelné. Vliv poruch způsobených bleskem působící negativně na jejich provozní spolehlivost se stává opravdovým problémem vzhledem k rostoucímu výkonu jednotlivých větrných elektráren a jejich stále častější výstavbě na pobřeží. Týká se to zejména případů, kdy několik velkých větrných elektráren je provozováno jako větrná farma, u níž je celkový výpadek výroby z důvodu jednoho úderu blesku nepřijatelný.

Na rozdíl od jiných elektrických zařízení, jako jsou venkovní vedení, elektrické stanice a elektrárny, kde jsou použity ochranné vodiče a zemnicí lana, větrné turbíny představují z důvodů fyzické velikosti a konstrukce odlišný problém z hlediska ochrany před bleskem. Větrné turbíny mají obvykle dvě nebo tři lopatky s průměrem do 100 m nebo více a jsou umístěny a otáčejí se ve výšce 100 m nad povrchem země. Kromě toho se u větrných turbín používá na konstrukční části vystavené zatížení velké množství vícevrstevných izolačních materiálů, jako jsou sklolamináty. Systém ochrany před bleskem musí být proto plně integrovaný do různých částí větrné elektrárny tak, aby se zajistilo, že všechny části, které pravděpodobně budou vystaveny účinkům blesku jsou schopné odolat úderu blesku a bleskový proud bude bezpečně sveden z těchto částí do země bez nepřiměřeného poškození nebo porušení systémů větrné turbíny.

Norma má podat informace pro konstruktéry, montážní firmy, zákazníky, provozovatele a certifikační orgány o současném stavu v ochraně větrných elektráren před bleskem.

1 Předmět normy

Během posledních let všichni velcí výrobci větrných elektráren věnovaly velkou pozornost vývoji vhodných systémů ochrany před bleskem a publikovaly se první výsledky s novým komplexním přístupem. V současné době je nicméně správné tyto zkušenosti promítnout do technické normy a dát tak obecné podklady pro výrobce a provozovatele větrných elektráren.

Na pozadí těchto skutečností se formovalo zaměření činnosti nové pracovní skupiny s cílem vytvořit technickou zprávu dříve než by se uvažovalo o vypracování kompletní normy. Činnosti s tím spojené lze shrnout do následujících bodů:

- identifikace hlavních problémů ochrany větrných elektráren před bleskem
- souhrn a utřídění existujících zkušeností týkajících se stávajících i nových konstrukcí větrných turbín
- popis vhodných metod pro vyhodnocení rizika poškození větrných turbín přepětím, umožňujících zvýšení spolehlivosti výpočtů ekonomické efektivity systémů ochrany větrných turbín před bleskem
- popis a přehled vhodných metod ochrany částí větrné elektrárny proti úderu blesku, zohledňující speciální povahu větrných turbín a použití velkého množství kompozitních materiálů
- vypracování technické zprávy shrnující současný stav řešení problémů. Pracovní skupina měla identifikovat a kvantifikovat oblasti, kde je potřebný další výzkum a standardizace

Tato technická zpráva se člení na:

- kapitolu 3, ve které je uvedena základní problematika blesku a jeho vliv na větrné turbíny
- kapitolu 4, ve které jsou uvedeny zkušenosti s poškozením větrných turbín bleskem, jak byly získány z národních databází větrných elektráren
- kapitolu 5, která popisuje ohodnocení rizik
- kapitolu 6 obsahující diskusi vhodných metod ochrany proti poškození větrných elektráren bleskem
- kapitolu 11 označující směry dalšího

2 Definice

Pro účely této části PNE se používají následující definice .

2.1 přípustná četnost blesků (*accepted lightning flash frequency N_c*)

maximální přípustná střední roční četnost blesků, které mohou způsobit poškození konstrukce větrné elektrárny

2.2 jímací soustava (*air-termination systém*)

část vnějšího systému ochrany před bleskem, která je určena k zachycení blesků

2.3 vodič pospojování (*bonding conductor*)

vodič, který propojuje jednotlivé části instalace za účelem vyrovnání potenciálu

2.4 sběrnice pospojování (přípojnice vyrovnání potenciálů) (*bonding bar*)

kovová sběrnice, přes kterou mohou být kovové instalace, napájecí síť nn, telekomunikační vedení a jiná kabelová vedení spojena se systémem ochrany před bleskem

2.5 nebezpečné jiskření (*dangerous sparking*)

nežádoucí elektrické výboje způsobené bleskovými proudy v chráněné konstrukci

2.6 četnost přímého úderu blesku do konstrukce N_d (*direct lightning flash frequency to a structure*)

střední roční předpokládaný počet přímého úderu blesku do konstrukce

2.7 soustava svodů (*down-conductor systém*)

část vnějšího systému ochrany před bleskem určena ke svedení bleskového proudu z jímací soustavy do uzemňovací soustavy

2.8 sestupný blesk (*downward flash*)

Úder blesku iniciovaný sestupným lídrem z mraku do země. Sestupný blesk je tvořen prvním krátkým úderem blesku, který může být doprovázen krátkými následnými údery a může obsahovat i dlouhý úder

2.9 zemnič (*earth electrode*)

jedna část nebo více částí uzemňovací soustavy, která vytváří přímý elektrický kontakt se zemí a rozptyluje bleskový proud do země

2.10 uzemňovací soustava (*earth-termination systém*)

část vnějšího systému ochrany před bleskem přepětím, která je určena ke svedení bleskového proudu do země a tam k jeho rozptýlení

2.11 účinná výška h (*effective height*)

účinná výška větrné elektrárny je nejvyšší bod, který dosáhnou lopatky, t.j. výška náboje rotoru plus poloměr rotoru

2.12 účinnost systému ochrany před bleskem E (*efficiency of LPS*)

poměr průměrného počtu přímých úderů blesku za rok, které nemohou způsobit poškození konstrukce k počtu přímých úderů blesku do konstrukce. E může být vyjádřena jako součin účinnosti zachycení E_i a odhadované účinnosti E_s vyjádřené pravděpodobností s kterou systém ochrany před bleskem chrání konstrukci před přímými údery blesku

2.13 ekvivalentní sběrný prostor A_e (*ekvivalent collection area*)

ekvivalentní sběrný prostor konstrukce je definován jako prostor povrchu země, který má stejnou četnost přímých úderů blesků jako konstrukce

2.14 vnější systém ochrany před bleskem (hromosvod) (*external lightning protection systém*)

skládá z jímací soustavy, soustavy svodů a uzemnění

2.15 náboj blesku Q_{flash} (*flash charge*)

časový integrál bleskového proudu za celou dobu trvání úderu blesku

2.16 základový zemnič (*foundation earthing electrode*)

ocelová armatura základu nebo dodatečný vodič, který je uložen v betonových základech objektu a je použit jako zemnič

2.17 četnost poškození přímými údery blesku (*frequency of damage by direct lightning flashes*)

průměrný počet přímých úderů blesku do konstrukce

2.18 hustota úderů blesku do země N_g (*ground flash density*)

průměrná hustota úderů blesku do země je počet úderů blesků na km^2 za rok, v oblasti, ve které je větrná elektrárna umístěna

2.19 účinnost zachycení E_i (*interception efficiency*)

pravděpodobnost s jakou jímací soustava systému ochrany před bleskem zachytí úder blesku

2.20 vnitřní systém ochrany před bleskem (*internal lightning protection system*)

všechna opatření doplňující opatření ve vnějším systému ochrany před bleskem, včetně ekvipotenciálního pospojování, zajištění bezpečné vzdálenosti a snížení elektromagnetických vlivů bleskového proudu ve chráněné konstrukci

2.21 systém ochrany před bleskem LPS (*lightning protection system*)

kompletní systém používaný pro ochranu stavby a jejího vnitřku proti účinkům blesku. Obvykle sestává jak z vnějšího tak i z vnitřního systému ochrany před bleskem.

2.22 bleskový proud i (*lightning current*)

proud tekoucí v místě úderu

2.23 náhodná součást LPS (*natural component of LPS*)

vodivá součást, která nebyla instalována pro ochranu před bleskem, ale která byla dodatečně použita k LPS nebo může v mnohých případech jednou nebo více částmi zabezpečit funkci LPS

2.24 vrcholová hodnota I (*peak value*)

maximální hodnota bleskového proudu

2.25 ekvipotenciální pospojování proti blesku (*lightning equipotential bonding*)

pospojování oddělených kovových prvků přímým vodivým spojením nebo připojením přes přepětové ochranné zařízení pro snížení rozdílů potenciálů způsobeným bleskovým proudem

2.26 dílčí výboj blesku (*lightning stroke*)

jednotlivý dílčí elektrický výboj úderu blesku do země

2.27 úder blesku do země (*lightning flash to earth*)

elektrický výboj atmosférického původu mezi mrakem a zemí, který se skládá z jednoho nebo více dílčích výbojů

2.28 zóna ochrany před bleskem LPZ (*lightning protection zone*)

zóny, ve kterých je definováno a kontrolováno elektromagnetické prostředí

2.29 dlouhý výboj (dlouhý dílčí výboj blesku) (*long stroke*)

výboj s dobou trvání T_{long} (doba mezi 10% hodnotou v čele impulzu a 10% hodnotou v týlu) tohoto souvislého proudu je zpravidla delší než 2 ms a kratší než 1 s (viz IEC 61024-1).

2.30 kovové instalace (*metal installations*)

rozsáhlé kovové části v konstrukci větrné elektrárny, které mohou vytvořit cestu pro bleskový proud jako, např. základová deska kabiny, stožár, žebříky, vodící koleje výtahu a vedení a vzájemně spojené ocelové armování

2.31 vícenásobné výboje (*multiple strokes*)

úder blesku, který se skládá v průměru ze 3 - 4 dílčích výbojů, s typickým časovým intervalem mezi nimi asi 50 ms

2.32 místo úderu (*point of strike*)

místo, kde blesk udeří do země, konstrukce nebo do systému ochrany před přepětím

2.33 hladina ochrany (*protection level*)

číslo značící klasifikaci systému ochrany před bleskem podle její účinnosti

2.34 riziko poškození (*risk of damage*)

pravděpodobnost ročních škod (u osob a věcí) v konstrukci větrné elektrárny způsobené bleskem

2.35 bezpečná vzdálenost (*safety distance*)

nejmenší vzdálenost mezi dvěma vodivými částmi v chráněné konstrukci, mezi kterými nemůže vzniknout nebezpečné jiskření

2.36 krátký výboj (krátký dílčí výboj blesku) (*short stroke*)

složka úderu blesku s dobou půltýlu T_2 zpravidla kratší než 2 ms (viz IEC 61024-1)

2.37 odhadovaná účinnost E_s (*sizing efficiency*)

pravděpodobnost, že zachycený bleskový výboj nezpůsobí poškození chráněné konstrukce

2.38 specifická energie W/R (*specific energy*)

časový integrál druhé mocniny bleskového proudu za celou dobu trvání blesku. Vyjadřuje energii rozptýlenou bleskovým proudem v jednotkovém odporu.

2.39 Svodič přepětí (*surge arrester*)

zařízení určené k ochraně elektrických přístrojů před vysokými přechodnými přepětími a pro omezení doby trvání a často i velikosti následného proudu. Termín svodič přepětí zahrnuje i jakékoliv vnější jiskřičky v sérii, které jsou nutné pro správnou funkci zařízení v provozu bez ohledu, zda je dodáno jako součást zařízení nebo není součástí zařízení

2.40 zařízení přepětové ochrany SPD (*surge protective device*)

zařízení určené k omezení přechodných přepětí a ke svedení impulzních proudů

2.41 bouřkové dny T_d (*thunderstorm days*)

počet bouřkových dní za rok získaných z izokeraunických map

2.42 vzestupný blesk (*upward flash*)

výboj blesku, který začíná vzestupným lídrem z uzemněného objektu do mraku. Vzestupný blesk se skládá z prvního dlouhého výboje, na který buď jsou nebo nejsou superponovány vícenásobné krátké výboje, po nichž mohou následovat další krátké výboje včetně možného dalšího dlouhého výboje.

3 Blesk a větrné elektrárny

3.1 Vlastnosti blesku

Dílčí výboj blesku může být považován za zdroj proudu. Maximální hodnota bleskového proudu produkovaný samostatným výbojem byla zaznamenána ve výši 300 kA. Podobně maximální hodnoty náboje přenesené a specifické energie jsou 400 C a 20 MJ/Ω.

3.2 Formování bleskového výboje a elektrické parametry

Výboje blesku jsou produkovány jako důsledek oddělení náboje v bouřkových mracích, tento proces je podrobně popsán v publikacích [1], [2] a [3]. Bleskový výboj nastane při vybití tohoto náboje do země nebo do nejbližšího mraku. Tato kapitola je věnována prvnímu z těchto výbojů, tzn. přenosu náboje mezi mrakem a zemí.

Bleskový výboj obvykle sestává z několika částí. Celá událost procházející jedním zionozovaným kanálem se nazývá blesk nebo úder blesku a může trvat i více než 1 s. Jednotlivé složky blesku se nazývají výboje.

Blesky se dělí na dva základní typy: sestupné a vzestupné.

Sestupné blesky začínají výbojem v bouřkovém mraku a směřují k zemi. Na rozdíl od sestupných blesků, vzestupné blesky začínají v nechráněné místě země (například vrcholky hor) nebo vrchol vysoké konstrukce a směřují k mraku.

Obvykle tyto základní druhy označovány jako „blesk mrak-země“ nebo „sestupný blesk“ a „blesk země-mrak“ nebo „vzestupný blesk“.

Oba typy blesku se dále dělí podle polarity náboje svedeného z mraku. Záporný výboj snižuje záporný náboj z mraku do země. Kladný výboj znamená přenos kladeného náboje z bouřkového mraku do země. Většina blesků je záporných, okolo 90 % ze všech blesků mrak-země. Kladné výboje tvoří zbývajících 10 % ze všech blesků mrak-země. Obvykle kladný výboj vykazuje vyšší elektrické parametry.

Každý blesk je odlišný z důvodů rozličnosti přírodních podmínek v bouřkovém mraku. Například není možné předpovědět vrcholovou hodnotu proudu příštího blesku do konstrukce. Je možné pouze říci, že s určitou pravděpodobností do konstrukce udeří blesk překračující jistou hodnotu.

Pravděpodobné rozdělení elektrických parametrů používaných k popisu blesku se získá pomocí přímého měření blesků do vysokých stožárů (viz [33] a [34]). Další informace je možné získat z údajů místních nebo národních systémů monitorování blesků. Tyto údaje zaznamenávají úder blesků a odhadovaný vrcholový bleskový proud.

Pro každý typ blesku (vzestupný/sestupný a kladný/záporný) je jiné pravděpodobnostní rozdělení popisující jeho elektrické parametry. Příslušná rozdělení pravděpodobnosti jsou uvedena dále spolu s tvarem vlny pro každý druh výboje. Daná úroveň pravděpodobnosti znamená pravděpodobnost, že daný elektrický parametr, během blesku převyší tabulkovou hodnotu. Existují empirické metody, které odhadují pravděpodobnost překročení daných hodnot elektrických parametrů (viz [4]).

3.3 Blesky mrak-země

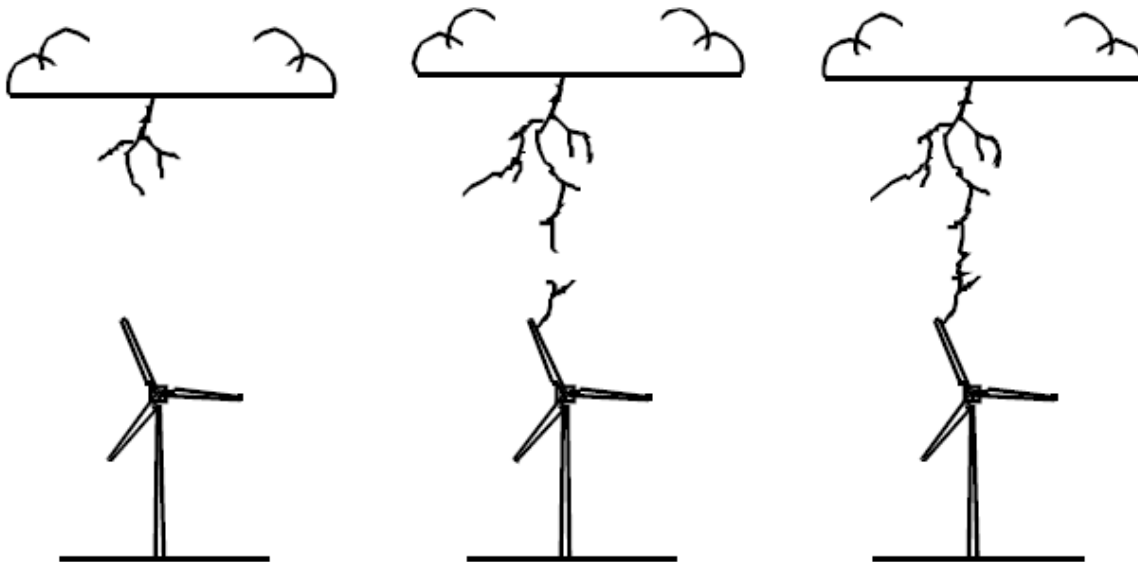
Blesk mrak-země (sestupný výboj) je z počátku formován **úvodním průrazem** uvnitř mraku. Do současné doby nebyl tento proces přesně fyzikálně objasněn. Více známé jsou části procesu výboje odehrávající se pod úrovní mraku.

3.3.1 Záporné blesky mrak-země

V případě záporného blesku **stupňovitý lídr** sestupuje z mraku směrem k zemi po krocích daných desítkami metrů s přestávkou přibližně 50 μ s mezi jednotlivými kroky. Kroky mají krátkou dobu trvání (typicky 1 μ s) impulsu proudů více než 1 kA. Kanál lídru obsahuje při plném rozvinutí celkový náboj 10 C nebo více. Průměr kanálu je v rozmezí do několika desítek metrů. Celková doba trvání krokového procesu je několik desítek milisekund. Kanál lídru není viditelný prostým okem.

Konec lídru (hrot lídru) má potenciál přesahující 10 MV vůči zemi. Jak se hrot lídru blíží k zemi, tento vysoký potenciál vyvolá na povrchu země silné elektrické pole. Jakmile elektrické pole na povrchu země překročí hodnotu průrazu na vzduchu, vznikne "odpovídající" lídr pohybující se směrem nahoru od země nebo konstrukce spojené se zemí. Tyto vzestupné lídry se obecně nazývají **vstříčné lídry**. Vstříčné lídry rozhodují o tom, do kterého místa objektu udeří blesk.

Setká-li se sestupný lídr se vzestupným vstříčným lídrem, je ustavena souvislá dráha z mraku na zem. Náboj obsažený v kanálu lídru potom je sveden do země proudovou vlnou, která se šíří ionizačním kanálem s rychlostí přibližně 1/3 rychlosti světla. Tento jev se nazývá **první zpětný (úplný) výboj**. První zpětný výboj může mít vrcholovou hodnotu až do stovek kA a dobu trvání několik stovek μ s. Na obrázku 1 je zobrazen proces vytváření sestupného blesku.

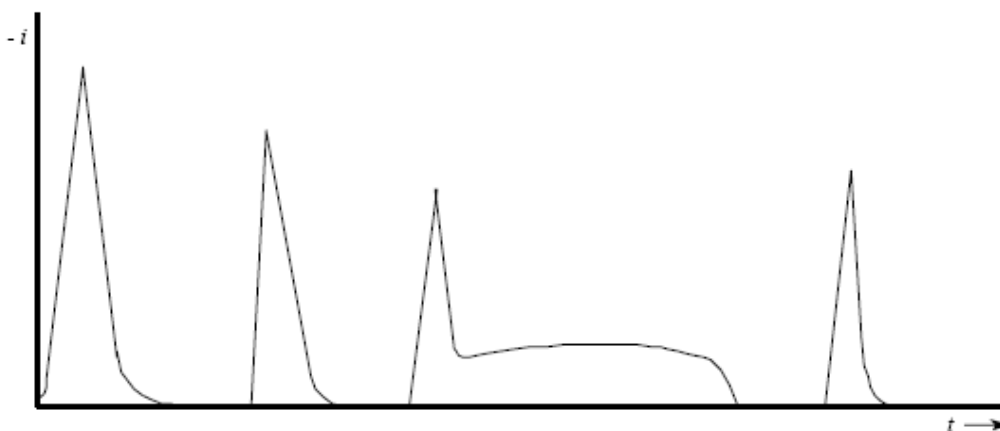


Obrázek 1 – Postup vzniku blesku mrak-země

Po určitém časovém intervalu může další sekvence sestupný/vstřicný lídr sledovat dráhu vytvořenou prvním výbojem. Lídr, který předchází těmto **následným výbojům**, obvykle není stupňovitý a je daleko rychlejší (doba trvání několik milisekund). Časový interval mezi po sobě jdoucími úplnými výboji v blesku je v řádu 10 ms až do několika set ms. V průměru se blesk skládá ze 3 až 4 úplných výbojů (včetně prvního). Úplné výboje tvoří viditelnou část blesku.

Po jednom nebo více úplných výbojích může stále ještě zionizovaným kanálem procházet **trvalý proud**. Trvalé proudy jsou značně odlišné od krátkodobých proudů úplných výbojů s vysokou amplitudou: průměrná amplituda proudu je v řádech stovek ampér, zatím co doba trvání může být až několik stovek ms. Trvalé proudy přenáší velké množství nábojů přímo z mraku do země. Okolo 1/2 všech blesků mrak-země obsahuje složku trvalého proudu.

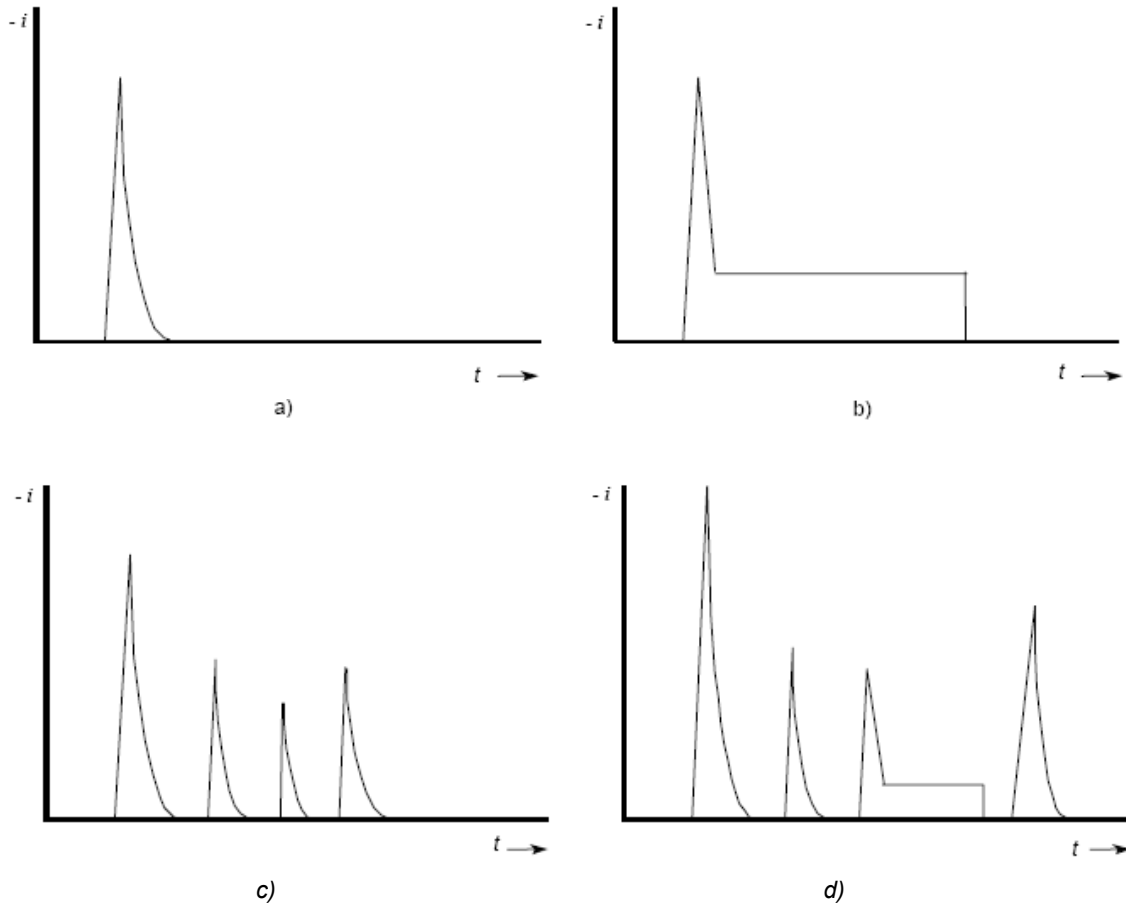
Na obrázku 2 je zobrazen typický profil záporného blesku mrak-země. Po kontaktu sestupného lídru a vstřicného lídru následuje první úplný výboj, který má za následek (na zemi) vysokou amplitudu impulsního proudu trvajícím několik stovek μ s. Vrcholová hodnota proudu je v rozmezí od několika kA do 100 kA., střední hodnota je asi 30 kA (viz tabulka 1). Následně po prvním úplném výboji mohou nastat **následné úplné výboje** a trvalý proud. Ačkoliv následné úplné výboje obvykle mají nižší vrcholový proud a kratší dobu trvání, než první úplný výboj, obvykle mají vyšší strmost proudu. Záporné blesky mrak-země mohou obsahovat rozmanité kombinace různých složek proudu výše uvedených, jak je zobrazeno na obrázku 3.



Obrázek 2 - Typický profil záporného blesku mrak-země (bez měřítka)

Tabulka 1 – Parametry bleskového proudu mrak-země

Parametr	Typ výboje	Úroveň pravděpodobnosti		
		95 %	50 %	5 %
Vrcholový proud kA	První záporný	14	30	90
	Následný záporný	4,6	12	30
	Kladný	4,6	35	250
Celkový náboj ^a C	První záporný	1,1	5,2	24
	Následný záporný	0,2	1,4	11
	Kladný	20	80	350
Specifická energie ^b kJ/Ω	První záporný	6,0	55	550
	Následný záporný	0,55	6,0	52
	Kladný	25	650	15000
Maximum di/dt	První záporný	9,1	24	65
	Následný záporný	10	40	162
	Kladný	0,2	2,4	32
^a $Q = \int i(t) dt$ ^b $E = \int i^2(t) dt$				



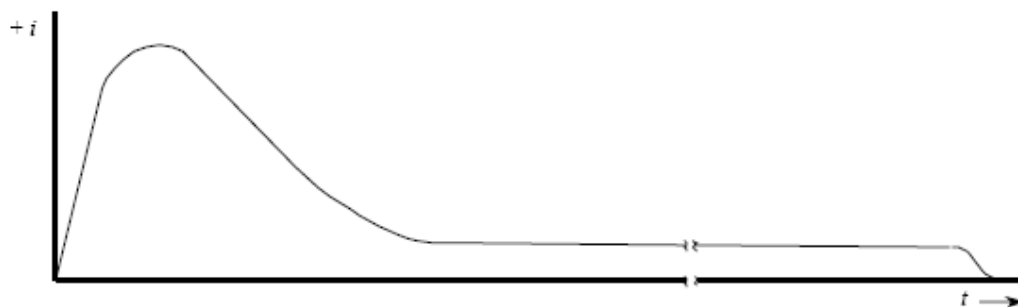
- a) Pouze první úplný výboj
- b) První úplný výboj se stálým a s pokračujícím proudem
- c) První úplný výboj s následným úplným výbojem
- d) První úplný výboj s následným úplným výbojem a pokračujícím proudem

Obrázek 3 - Typické profily záporného blesku mrak-země (bez měřítka)

3.3.2 Kladné blesky mrak-zem

Oproti záporným bleskům jsou kladné blesky mrak-země iniciovány plynule se šířícím **sestupným lídrem**, který nevykazuje rozlišitelné skoky. Fáze vstřícného lídru a úplného výboje jsou podobné jako procesy popsané v 3.3.1. Kladný blesk mrak-země je obvykle tvořen jedním úplným výbojem, po kterém může následovat stálý proud.

Kladné blesky mrak-země jsou velmi důležité pro praktickou ochranu proti blesku, protože vrcholová hodnota proudu, celkový přenos náboje a specifická energie mohou být značně větší ve srovnání se zápornými blesky. Úplné výboje mají tendenci mít nižší rychlost nárůstu proudu ve srovnání se záporným prvním úplným výbojem. Na obrázku 4 je zobrazen typický profil kladného blesku mrak-země (bez měřítka). V tabulce 1 [33] a [34] jsou uvedeny souhrnné elektrické parametry spolu s parametry negativních přeskoků.

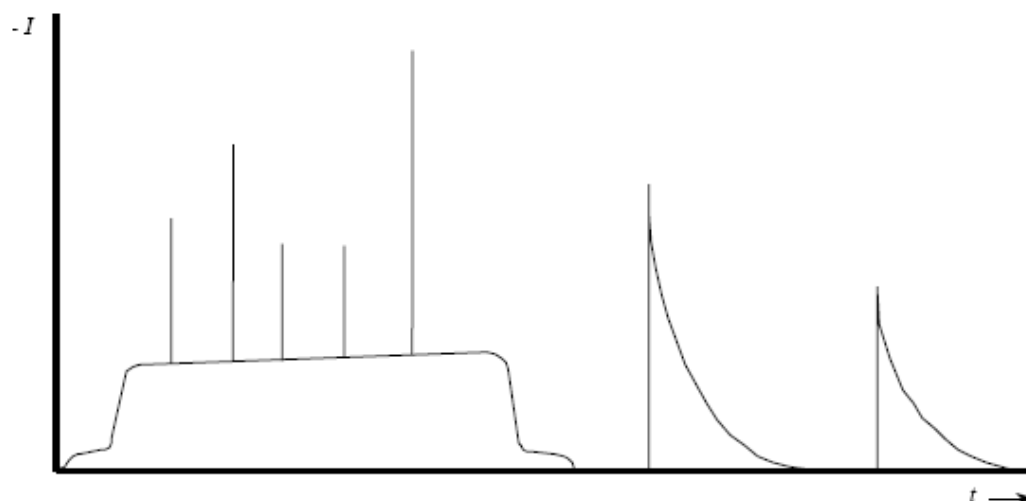


Obrázek 4 – Typický profil kladného blesku mrak-země

3.4 Vzestupně vyvolané blesky

Náboj v bouřkovém mraku způsobí zvýšení intenzity elektrického pole na povrchu země, ale obvykle to není dostatečné ke vzniku pohybujícího se vzestupného lídru. Nicméně v horách, na objektech umístěných na vysokém základu nebo na vysokých stožárech nebo větrných elektrárnách může dojít k významnému zvýšení intenzity elektrického pole. V takových lokalitách intenzita elektrického pole může vzrůst natolik, že iniciuje lídr pohybující se vzhůru ze země směrem k bouřkovému mraku. Konstrukce o větší výšce než 100 m nad okolním terénem (například větrné elektrárny) jsou vystaveny zejména vzestupným vyvolaným bleskům.

Vzestupně vyvolaný blesk začíná fází stálého proudu. Na fázi stálého proudu se superponují impulsní proudy (obrázek 5). Fáze stálého proudu může být následována následným úplným výbojem procházejícím stejným kanálem. Tyto úplné výboje jsou docela podobné následným úplným výbojům blesků mrak-země (viz 3.3). Vzestupně vyvolané výboje neobsahují složku analogickou prvnímu úplnému výboji úderů mrak-země. Místo na konstrukci, odkud vychází vzestupný úder blesku je jednoduše totéž místo, ve kterém se vytvořil vzestupný lídr.



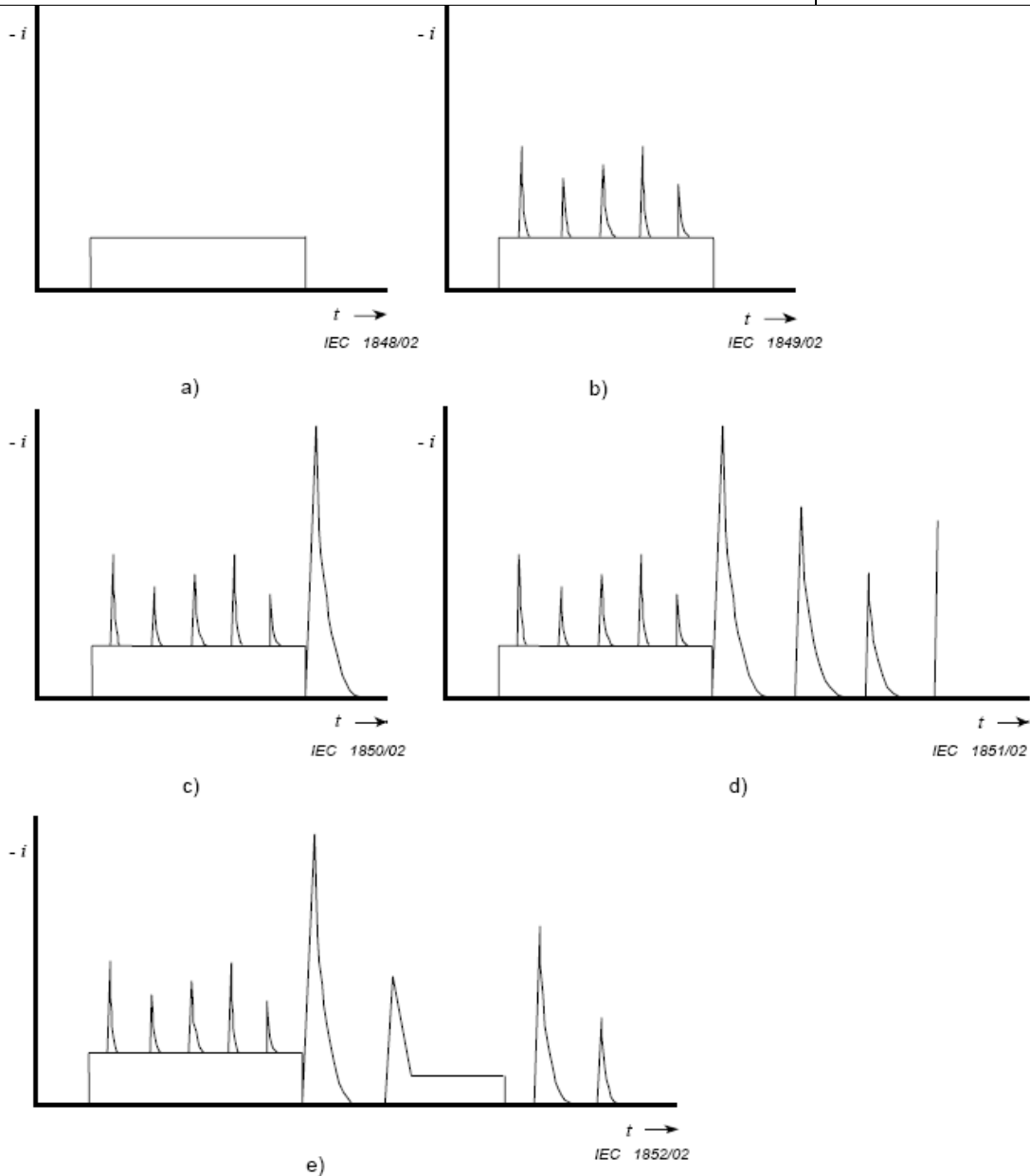
Obrázek 5– Typický profil záporného vzestupného blesku

Měření parametrů vzestupně iniciovaných výbojů se provádí na vysokých objektech, u nichž je tento typ výboje pravděpodobný. Například do televizní věže může udeřit i 50 blesků tohoto typu ročně. V literatuře [6] a [7] jsou uvedeny výsledky měření vzestupných blesků u telekomunikační věže v Peissenbegu - Bavorsko. Následující informace o proudových parametrech se týkají záporných vzestupných blesků, protože kladné vzestupné blesky, ač byly pozorovány, jsou vzácné.

Ačkoliv je možné považovat hodnoty vrcholového proudu 10 kA za relativně nízké, může být přenesený náboj vyvolaný počátečním stálým proudem vyšší než 300 C, jak je uvedeno v tabulce 2 [6]. Také vzestupně iniciované výboje mohou sestávat z různých kombinací rozdílných proudových složek zmíněných výše, viz obrázek 6.

Tabulka 2 – Parametry vyvolaného vzestupného proudu blesku

Parametr		Maximální hodnota
Celkový přenesený náboj	C	300
Celková doba trvání	s	0,5 – 1,0
Vrcholový proud	kA	20
Průměrná strmost superponovaných impulsních proudů	kA/ μs	20
Počet superponovaných impulsních proudů		50



- a) Pouze stálý proud (počáteční)
- b) Počáteční stálý proud se superponovanými impulsy
- c-d) Počáteční stálý proud se superponovanými impulsy a následný úplný výboj
- e) Počáteční stálý proud se superponovanými impulsy plus následný úplný výboj se stálým proudem

Obrázek 6– Různé profily záporných vzestupných vyvolaných blesků

3.5 Ochrana větrných elektráren proti blesku – základní problém

Ochrana moderních větrných elektráren proti blesku představuje problémy, se kterými se normálně u jiných konstrukcí nesetkáme. Tyto problémy je možné spatřovat v následujících příčinách:

- Větrné elektrárny tvoří vysoké konstrukce o výšce do i nad 150 m;
- Větrné elektrárny se často umísťují do lokalit velice vystaveným úderům blesků;
- Součásti větrné turbíny nejvíce vystavené působení blesku, jako jsou lopatky a kryt gondoly jsou často vyrobeny z kompozitních materiálů nezpůsobitelných vydržet přímý úder blesku nebo vést bleskový proud;
- Lopatky a gondola se otáčejí;
- Bleskový proud musí být sveden konstrukcí větrné elektrárny do země, tak že významné části bleskového proudu budou procházet prakticky všemi součástmi větrné turbíny nebo v jejich blízkosti;
- Větrné elektrárny ve větrných farmách jsou elektricky propojeny a často umístěny v lokalitách se špatnými podmínkami pro uzemnění.

Vysoká štíhlá konstrukce má, jak je známo, vliv na vlastní proces blesku. U konstrukcí s výškou nad 60 m se vyskytují boční blesky, kde několik procent blesků udeří do boku konstrukce namísto do vrcholu. Právě takovéto údery jsou příčinou problémů u větrných elektráren, protože boční údery do listů vrtule je mohou vážně poškodit, přestože jsou chráněné.

Navíc s výškou vzrůstá podíl vzestupných vyvolaných blesků a stávají se významným faktorem pro konstrukce o výšce okolo 100 m [8].

Větrné elektrárny se často umísťují do lokalit vystaveným silným větrům, jako jsou pobřeží, na vrcholcích kopců nebo na horských hřebenech. Takováto umístění často mají relativně vysoký výskyt blesků. Větrné elektrárny jsou také přednostně umísťovány vysoko nad úroveň okolního terénu a daleko od jiných vysokých objektů, toto má za následek větší náchylnost k úderu blesku. Dalším problémem vyplývajícím z umístění větrných elektráren na kopcích a hřebenech hor je uzemňování. Rezistivita půdy v těchto lokalitách je často velmi vysoká.

Lopatky velkých moderních větrných turbín jsou často vyrobeny z kompozitních materiálů, jako je sklolaminát nebo kombinace dřeva a laminátu. Lopatky vyrobené z tohoto materiálu jsou samy o sobě nechráněné proti přímému úderu blesku a ten vždy způsobí jejich těžké poškození, protože tyto materiály jsou špatnými vodiči bleskového proudu. Proto je ochrana proti blesku takových lopatek velmi důležitá. Některé kryty gondoly jsou vyrobeny ze sklolaminátu, a proto musí být také chráněny před přímými údery blesků.

Skutečnost, že jsou větrné turbíny točivé stroje, přináší speciální problémy. Je jím riziko úderů blesku do více než jednoho místa otáčejících se lopatek, a dokonce do více než jedné lopatky. Je to způsobené výboji blesku, které jsou tvořeny několika oddělenými proudovými pulsy během doby trvající až 1 s. To je dostatečná doba pro působení blesku na více než jednu lopatku (například třílistá větrná turbína, která otáčí lopatky rychlostí 20 ot/min, otočí za 1 s listy o 120 °). Udeří-li blesk do lopatek, projde bleskový proud celou konstrukcí turbíny do země. A to včetně rozteče ložisek, hrdla a hlavní hřídele ložiska, převodovky, ložisek generátoru, základové desky, ložiska směrového natáčení a stožáru. Bleskový proud procházející převodovkami a ložisky může způsobit jejich poškození, zejména je-li mazací vrstva mezi válečky a oběžnými drážkami nebo mezi zuby ozubeného kola.

Technika ochrany proti blesku elektrických systémů je běžně dostupná a popsána v souboru IEC 61024 a IEC 61312. Speciální pozornost je třeba věnovat skutečnosti, že bleskový proud procházející větrnou turbínou bude v těsnější blízkosti k elektrickým systémům, ve srovnání s elektrickými instalacemi v budovách. To se také týká bezpečnosti osob, protože nemají možnost dosáhnout minimálních bezpečných vzdáleností uvedených v IEC 61024-1.

3.6 Stávající normy a technické zprávy IEC týkající se ochrany proti blesku

V tabulce 3 jsou uvedeny normy a technické zprávy týkající se ochrany proti blesku. V tabulce 4 jsou uvedeny připravované normy v TC 81. Žádná z těchto norem neřeší přímo problematiku ochrany větrných elektráren proti blesku. Nicméně pro větrné elektrárny se mohou použít zásady uvedené v těchto normách a také se doporučuje využít návody popsané v citovaných technických zprávách.

Z následných diskusí vyplynuly zásady použitelné pro větrné elektrárny.

Tabulka 3 – Normy a technické zprávy IEC

Číslo publikace	Název
IEC 61024-1	Ochrana staveb před bleskem – Část 1: Všeobecné zásady
IEC 61024-1-1	Ochrana staveb před bleskem – Část 1: Všeobecné zásady – Oddíl 1: Návod A: Volba hladin přepětí pro systémy ochrany před bleskem
IEC 61024-1-2	Ochrana staveb před bleskem – Část 1-2: Všeobecné zásady – Návod B: Návrh, instalace, údržba a kontrola systémů ochrany před bleskem
IEC 61312-1	Ochrana staveb před atmosférickým impulsem vyvolaným bleskem – Část 1: Všeobecné zásady
IEC/TS 61312-2	Ochrana staveb před atmosférickým impulsem vyvolaným bleskem – Část 2: Stínění staveb, pospojování uvnitř staveb a uzemňování
IEC/TS 61312-3	Ochrana staveb před atmosférickým impulsem vyvolaným bleskem – Část 3: Požadavky na přepětíová ochranná zařízení (SPDS)
IEC/TS 61312-4	Ochrana staveb před atmosférickým impulsem vyvolaným bleskem – Část 4: Ochrana zařízení ve stávajících stavbách
IEC/TR 61662+A1	Stanovení rizika poškození způsobené bleskem
IEC 61663-1 + Oprava 1	Ochrana před bleskem – Telekomunikační vedení – Část 1: Instalace s optickými kabely
IEC 61663-2	Ochrana před bleskem – Telekomunikační vedení – Část 2: Vedení s kovovými vodiči

IEC 61024-1 rozvádí základní principy a definice pro ochranu před bleskem všeobecných staveb s výškou do 60 m. Poskytuje informace pro návrh, instalaci, údržbu a kontrolu účinných systémů ochrany budov před bleskem, také osob, instalací a zařízení budov. Protože moderní větrné elektrárny mají výšku často přes 60 m, nespádají pod zaměření této normy. Nicméně stavby o výšce přesahující 60 m budou řešeny v 2 vydání normy (viz tabulka 4). Tato norma IEC však neřeší následující objekty, které by mohly být podobné větrným elektrárnám: elektrické distribuční soustavy a soustavy pro výrobu elektrické energie, systémy telekomunikační, dopravní a pobřežní instalace.

IEC 61024-1-1 obsahuje výpočetní metody rizika úderu blesku do běžných staveb a metody pro výběr hladin ochrany, které sníží riziko pro osoby na přijatelnou hladinu. IEC 61024-1-2 je návod jak navrhnout systémy ochrana před bleskem u běžných budov.

IEC 61312-1 obsahuje základy pro ochranu elektrických a elektronických systémů proti nepříznivým účinkům elektromagnetických impulsů vyvolaných bleskovým proudem, stejně jako přímo průtokem proudu blesku jednotlivými částmi. Norma se netýká vozidel a pobřežních instalací.

V technických zprávách IEC 61312-2, IEC 61312-3, IEC 61312-4 a IEC 61312-5 (viz tabulka 3) je obsaženo více podrobností týkajících se ochrany elektrických a elektronických zařízení před bleskem pomocí stínění staveb, pospojování uvnitř staveb a uzemňování pomocí přepětíových ochranných zařízení (SPDS).

Technická zpráva IEC 61662 uvádí podrobné metody pro ohodnocení rizika poškození úderu blesku. Doplňuje IEC 61024-1-1 o problematiku spolehlivosti a ekonomické úvahy.

IEC 61663-1 a IEC 61663-2 se zabývá problematikou ochrany telekomunikačních systémů.

Nakonec technická zpráva IEC 61819 (viz tabulka 4) uvádí základní parametry používané při prostředí laboratoře k simulování vlivu blesku na prvky ochrany před bleskem včetně požadavků na přepětíová ochranná zařízení (SPDS). Tato zpráva může být pro větrné elektrárny zvláště potřebná, jsou-li zkoušeny komponenty ochrany před bleskem, jako jsou systémy ochrany lopatek.

Tabulka 4 – Normy a technické zprávy připravované v TC 81

Číslo publikace	Název
IEC 61024-1 2. vydání	Ochrana staveb před bleskem – Část 1: Ochrana před fyzickým poškozením a ohrožením života bleskem
IEC/TS 61312-3 + Změna 1	Koordinace požadavků na přepětová ochranná zařízení (SPDS) ve stávajících stavbách
IEC 61662 2. vydání	Řízení rizika před bleskem
IEC /TR 61819	Parametry zkoušky simulující působení ochrany prvků před bleskem

4 Statistiky o škodách na větrných elektrárnách

4.1 Data o škodách na větrných elektrárnách způsobených bleskem

Databáze větrných elektráren existují v několika evropských zemích a obsahují 4 000 větrných elektráren. Prvotní data jsou obvykle uvedena ve formě dobrovolných měsíčních zpráv vlastníků a provozovatelů, nebo na požadavek speciálních subvenčních programů. Vládní nebo dotované organizace sumarizují měsíční nebo roční statistiky. Z poruch nebo škod způsobených bleskem se sestavují databáze, které představují významnou pomoc při identifikaci rizika. Výrobcům a vlastníkům větrných elektráren jsou k dispozici tyto databáze při zhodnocení a specifikaci systémů ochrany proti blesku.

4.2 Statistiky škod

4.2.1 Četnost škod

Škodní událost se zanesou do databáze jako porucha větrné elektrárny způsobená - podle úsudku osoby podávající zprávu - přímo nebo nepřímo bleskem. Souhrn o těchto poruchách v Německu, Dánsku a Švédsku je uveden v tabulce 5. Poruchy způsobené bleskem se pohybují od 3,9 do 8 událostí pro 100 větrných elektráren za rok. Nové údaje v severní Evropě hovoří o tom, že by mohly být poškozeny bleskem 4 až 8 větrných elektráren ze 100 /rok.

Tabulka 5 – Četnost škod

Stát	Období	Počet VE v databázi	Výkon MW	VE x roky	Počet poruch bleskem	Počet poruch na 100 VE/rok
Německo	1991-1998	1498	352	9204	738	8,0
Dánsko	1990-1998	2839	698	22000	851	3,9
Švédsko	1992-1998	428	178	1487	86	5,8

Tato souhrnná čísla jsou samozřejmě ovlivněna mnoha proměnnými včetně místní bouřkové aktivity, celkovou výšku větrné elektrárny, ochranou větrné elektrárny (údery blesků do dobře chráněných VE nemusí být zahrnuty v databázi, nezpůsobí-li poškození) a tvar místního terénu.

V tabulce 6 jsou uvedeny druhy terénu a riziko pro Německo.

Tabulka 6 – Škody způsobené bleskem s ohledem na místo

Kategorie místa	Počet VE	Výkon MW	VE x roky	Počet poruch bleskem	Počet poruch na 100 VE/rok	Přímé údery %	Nepřímé údery ^a %
Pobřeží	616	178	4018	223	5,6	33,6	65,9
Severní nížina	519	88	3213	239	7,4	23,4	76,6
Nízké kopce	363	86	1973	277	14,0	30,3	69,3
Celkem	1498	352	9204	739	8,0	29,1	70,6

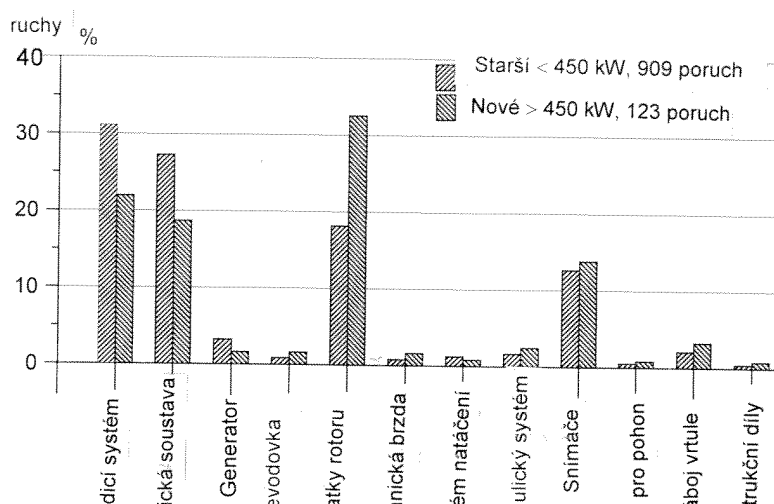
^a Poškození způsobené nepřímými údery nejsou způsobeny údery přímo do konstrukce.

Větrné elektrárny instalované v oblastech nízkých hor mají vyšší riziko poškození bleskem (14 poruch na 100 VE/rok) ve srovnání s větrnými elektrárnami instalovanými na pobřeží (dále viz 4.4).

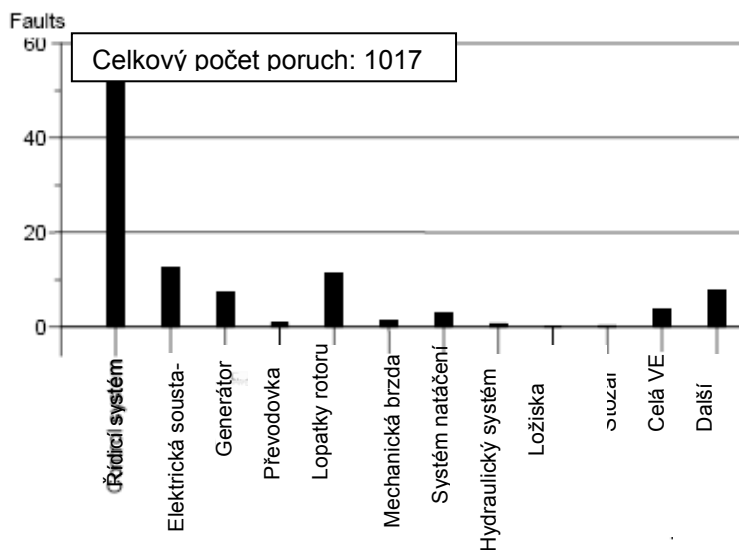
4.2.2 Poškození specifických součástí VE

Rozčlenění škodních událostí podle druhu poškozené součásti může poskytnout vhodné vstupní informace pro ocenění rizik (viz kapitola 5).

Na obrázku 7 je zobrazen sloupcovým diagramem vzájemný poměr pro několik kategorií z databáze VE v Německu a na obrázku 8 v Dánsku při použití stejné metodiky. Je zajímavé, že ačkoliv nejsou kategorie souborů stejné, 40 % až 50 % všech zaznamenaných událostí je možno přičíst poškození řídicího systému bleskem.



Obrázek 7 - Poruchy systémů (Německo)



Obrázek 8 - Poruchy systémů (Dánsko)

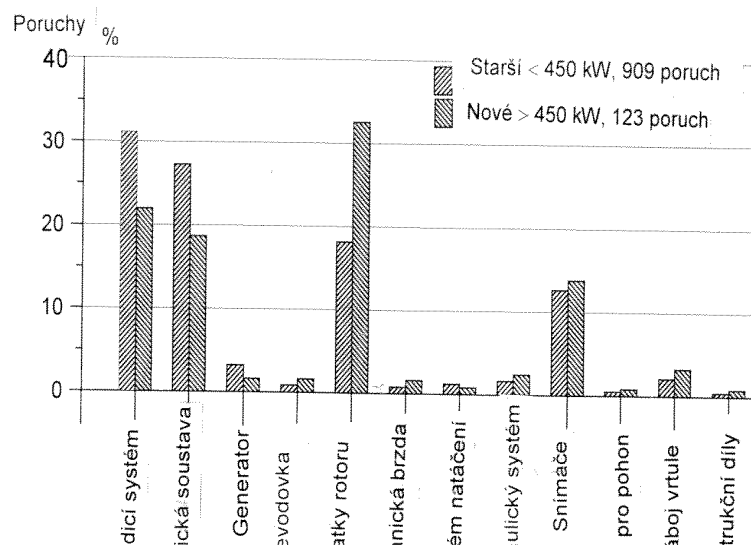
V tabulce 7 jsou uvedeny souhrnné údaje databáze Švédska. Švédské údaje ukazují, že 43 % ze všech poruch připadá na systém řízení a 5,8 případů na 100 VE/rok připadá na poškození bleskem. Je zde nutné zaznamenat, že poškození lopatek je o 47 % častější v této databázi pro větrné turbíny s brzdami.

Tabulka 7 – Souhrn poruch bleskem (Švédsko)

Typ	VE x roky	Počet poruch bleskem	Počet poruch na 100 VE/rok	Poruchy systémů na 100 VE/rok			
				Lopatky	Řízení	Silová část	Jiné
Brzda	586	43	7,3	0,7	3,1	2,4	1,2
Bez brzdy	901	43	4,8	0,3	2,2	1,3	0,9
Celkem	1487	86	5,8	0,4	2,6	1,7	1,0

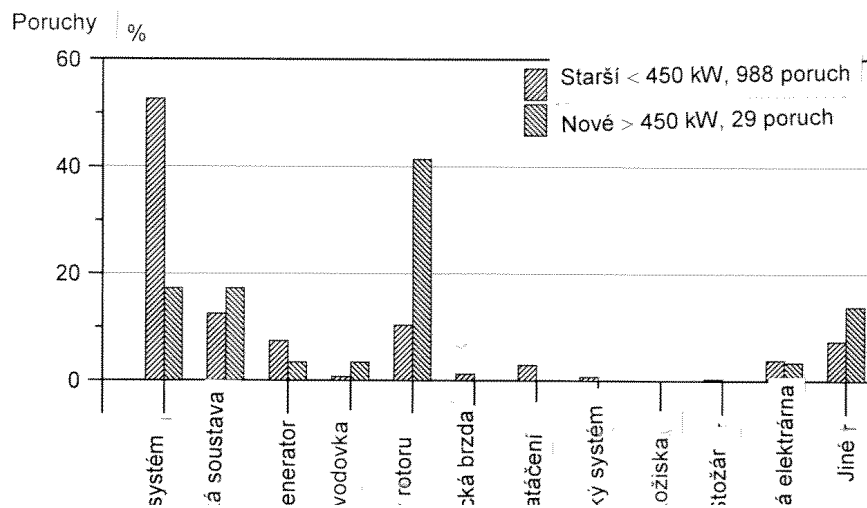
4.2.3 Velikost VE a doba v provozu

Je dobré mít rozdělení poškození prvků VE jako funkci velikosti VE. Jak již bylo uvedeno, moderní větrné turbíny jsou vyšší a současně mají vyšší výkon a vyšší účinnost ochrany proti poškození bleskem. Z důvodů porovnání se považují větrné turbíny o výkonu nad 450 kW za turbíny s moderní konstrukcí. U těchto turbín jsou aplikovány opatření pro ochranu před bleskem. Následující obrázky (obr. 9 pro Německo a obr. 10 pro Dánsko) znázorňují rozložení poškození prvků u nových a starších konstrukcí o výkonu do a nad 450 kW.



Obrázek 9 – Poruchy prvků VE (Německo)

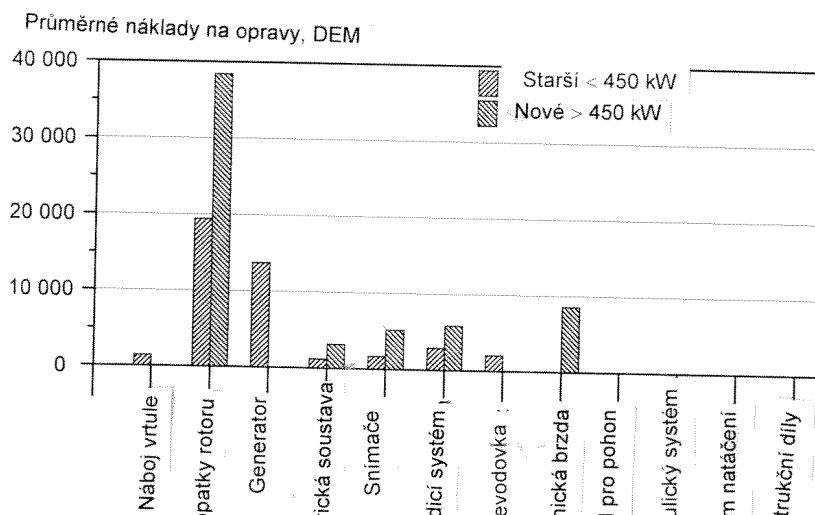
Je třeba poznamenat, že charakter poškození je jiný pro nové turbíny ve srovnání se staršími typy. U starších typů dochází nejčastěji k poškození systému řízení, zatímco poškození lopatek je nejčastější typ poškození u novějších typů. Je potěšitelné, že v posledních letech došlo ke zlepšení ochrany systému řízení před bleskem.



Obrázek 10 – Poruchy prvků VE (Dánsko)

4.2.4 Náklady na opravu poškození bleskem

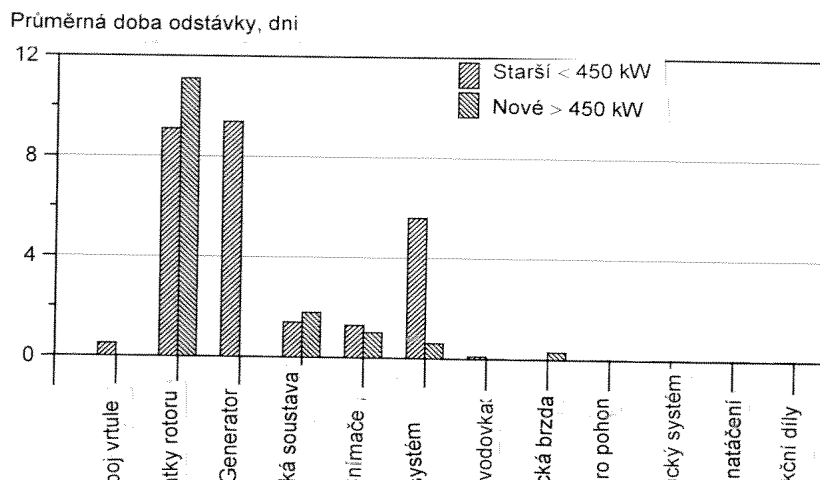
Průměrné náklady na opravu (v DEM) prvků, vycházející z databáze v Německu, jsou uvedeny na obrázku 11. Graf obsahuje zaznamenané náklady na výměnu nebo opravu, včetně mzdových nákladů, nákladů na díly a použití zdvihací techniky apod. Oprava poškozených lopatek je zdaleka nejnákladnějším druhem opravy a jak je možné očekávat, u velkých VE je většina typů oprav nákladnější.



Obrázek 11 – Náklady na opravu z hlediska prvků a velikostí turbíny

4.2.5 Vliv na výrobu elektřiny

Turbíny poškozené úderem blesku mají určité doby odstávky vyvolané diagnostikováním rozsahu poškození a následné opravy. Výpadek výroby elektřiny jde tak na vrub majitele VE. Na obrázku 12 jsou uvedeny průměrné doby odstávky z důvodů poruch získané z údajů v Německu. Poškození generátoru a lopatek způsobují dlouhé odstávky, vyžadující dlouhý čas a přepravní nároky. Také oprava systému řízení vyžaduje dlouhou odstávku VE.



Obrázek 12– Průměrná doba odstávky podle prvku a velikosti turbíny

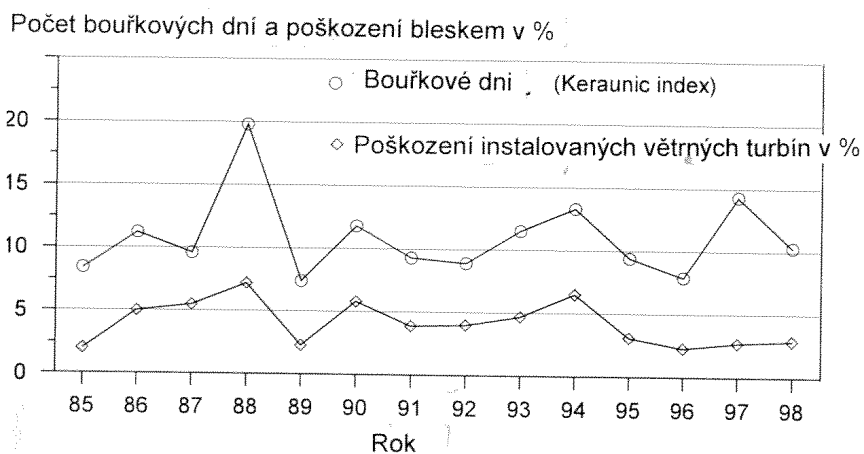
Je zajímavé porovnat výpadek výroby kvůli poškození způsobené bleskem s těmi, které vyplývají z jiných poruch. Takové porovnání je uvedeno v tabulce 8 (data z Dánské databáze) pro roky 1992-1997. Poruchy způsobené bleskem mají určitě větší vliv, než ostatní poruchy.

Tabulka 8 – Srovnání pravděpodobných ztrát z výpadku výroby elektřiny a ostatních poruch

Poruchy	Počet událostí	Průměrná doba odstávky VE h	Průměrná ztráty elektřiny kWh
Všechny poruchy	10 192	91	2 249
Poruchy bleskem	461	110	3 200
Rozdíl od průměrné poruchy	-	+ 20,8 %	+ 42,2 %

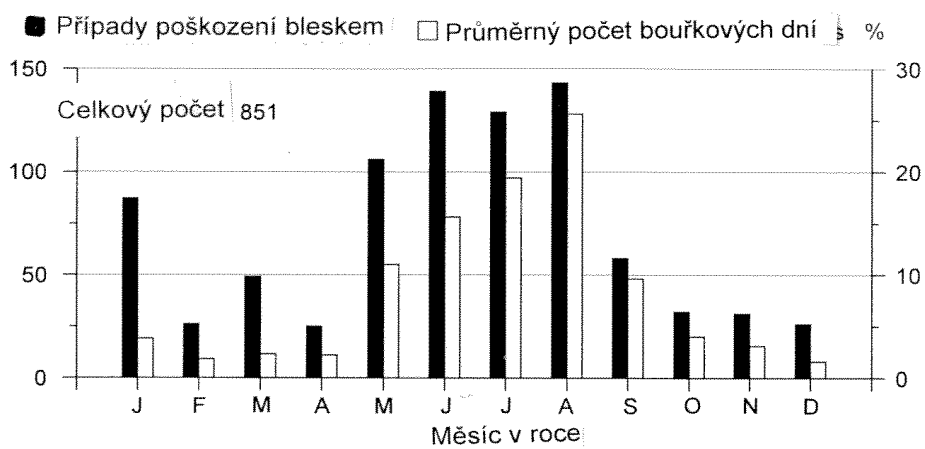
4.2.6 Sezónní rozložení poruch

Jak již bylo v této normě uvedeno, přepětí způsobené bleskem má pravděpodobnostní charakter. Blesková aktivita a úder blesku do země kolísají sezónně a v průběhu roku. Na obrázku 13 jsou uvedeny poruchy VE bleskem v závislosti na ročních bouřkových dnech v Dánsku.

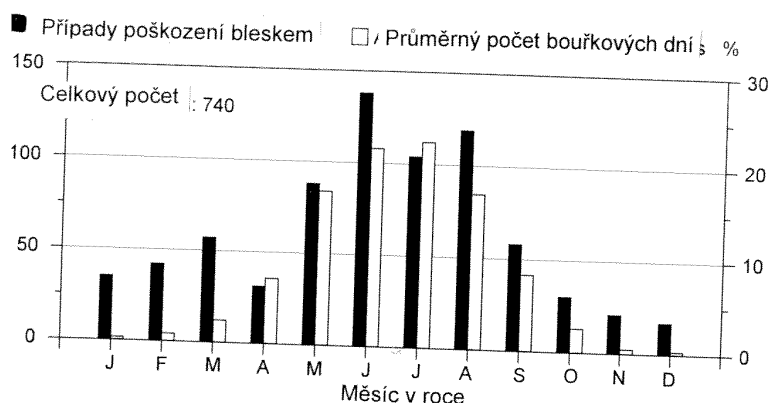


Obrázek 13– Roční střídání bleskové aktivity a poškození v Dánsku

Obrázky 14 a 15 uvádí informace z databází Německa a Dánska, které zobrazují tato kolísání během roku. Je třeba uvést, že v zimě je v obou zemích četnost bouřek výrazně nižší než v letních měsících.



Obrázek 14– Poruchy způsobené bleskem v Dánsku (1990-1998)



Obrázek 15– Poruchy způsobené bleskem v Německu (1991 1998)

4.3 Slabé a silné stránky databáze

Ve Švédsku, Dánsku a Německu existují databáze týkající se provozování a údržby pro značný počet VE. Tyto databáze mají mnoho silných stránek, ale i problémů souvisejících s jejich využitím při interpretaci údajů o škodách způsobených bleskem.

4.3.1 Všeobecně

Výsledky analýzy těchto databází se mohou lišit z těchto důvodů:

- různé výšky VE;
- rozdílné úrovně ochrany VE proti blesku;
- schopnosti místní distribuční sítě k vedení rázových vln (u venkovního vedení);
- rozdíly v místních úrovních výskytu blesků nebo topografii;
- rozdíly praktik hlášení a spolehlivosti hlášení o spolehlivosti.

Jeden úder blesku může způsobit vícenásobné poruchy. Může se zcela lišit, jakým způsobem jsou údaje zpracovány a jakým způsobem vypracuje operátor zprávu o poškození. Tedy vlastnosti databází nebo hlášení o poruchách jsou samy o sobě problémem (neuvede-li se VE automaticky opět do provozu). Výsledkem je, že u VE s dobrou ochranou proti blesku nejsou zaznamenány přímé nebo nepřímé údery blesku. Používání těchto databází k ocenění úrovně rizika mají tendenci směřující k podceňování- zejména v případě novějších lépe chráněných VE.

4.3.2 Dánsko

Existuje poměrně přesná databáze o provozu a údržbě přibližně 3500 VE instalovaných v Dánsku, které jsou provozovány:

Energi og Miljoedata
Niels Jernes Vej 10
DK 9220 Aalborg, Denmark

Tato databáze je často uváděna v odborném tisku.

4.3.3 Německo

Údaje týkající se událostí způsobených bleskem v Německu pochází z programu „250 MW-Vitr“ z doprovodného programu WMEP provozovaný:

Institut für Solare Energieversorgungstechnik e. V. (ISET)
Königstor 59
D-34119 Kassel, Germany

Všichni operátoři VE v tomto programu jsou povinni dodávat ISET hlášení o údržbě a opravách minimálně jednou za 10 let. Tato hlášení se musí zpracovat v případě poruch turbíny, včetně předpokládaných případů, jako jsou úderů blesků. V rámci povinností operátorů spolupracujících s WMEP se má provést výběr základních a stálých údajů o probíhajícím programu, mají se uvádět údaje ze spolehlivého zdroje.

4.3.4 Švédsko

Majitelé VE v Švédsku musí zasílat měsíčně zprávy o údržbě a výrobě. Švédská databáze je provozována:

SwedPower AB, Vindstatistik
P.O. Box 527
S-162 16 Stockholm, Sweden

4.4 Závěry a doporučení

4.4.1 Závěry

Uvedené údaje zdůrazňují potřebu zvýšit úroveň zabezpečení VE ochranou proti blesku.

Z uváděných dat lze vyvodit, že:

- v evropských severních zemích dojde ke 4 až 9 poruchám způsobených bleskem za rok na 100 VE
- VE umístěné v nízkých pohořích v Německu vykazují 14 poruch způsobených bleskem za rok na 100 VE ;
- 7 – 10 % poruch způsobených bleskem zahrnovalo i poškození lopatek;
- 43 – 51 % poruch způsobených bleskem zahrnovalo poškození systému řízení;
- 20 – 32 % poruch způsobených bleskem zahrnovalo poškození silového systému;
- poruchy způsobené bleskem mají za následek o 40 % více nedodané energie a o 20 % více odstávek ve srovnání s průměrem ostatních poruch;
- ačkoliv je poškození lopatek uváděno jako typ škody s nejvyššími následky, nejběžnější poruchou bylo poškození řídicího systému.

Nicméně lze uvést, že existují námitky, které mají být uvedeny v souvislosti s výše uvedenými údaji. Například:

- rozdíly četnosti úderů blesků mohou být značné dokonce v jedné zemi nebo regionu;
- u VE s dobrou ochranou proti blesku nejsou zaznamenány v databázi přímé nebo nepřímé úderů blesku, které nezpůsobí poruchu;
- rozdílné výšky VE, různé hladiny ochrany a místní topografie mají vliv na tyto statistiky;
- rozdíly v praktických postupech při hlášení ovlivňují také tyto statistiky

4.4.2 Zlepšení úrovně databáze

Aby se zlepšilo pochopení dopadů různých mechanismů způsobujících škody je účelné, aby vlastníci VE zahrnuli do zpráv více informací o nákladech. Není to vždy proveditelné, ale pokud je to možné, tak se doporučuje je uvádět. V příloze A je uveden dotazník týkající se škod způsobených bleskem.

5 Výpočet rizika škod způsobených na větrné elektrárně bleskem

5.1 Úvod

Návrh jakéhokoliv systému ochrany před bleskem musí brát v úvahu riziko úderů blesků a nebo poškození konstrukce VE. Riziko úderů blesku do jakékoliv konstrukce je funkcí výšky konstrukce, místní topo-

grafie a místní úrovně bleskové aktivity. Škody způsobené bleskem mohou mít také formu nebezpečí dotykových/krokových napětí nebo výbuchů a požárů způsobených úderem blesku. Škody způsobené bleskem mohou být také ve formě fyzického poškození konstrukce nebo jejích částí. Informace o lokálních podmínkách blesku mají být vždy jak je to jen možné získány (například ve vysokých zeměpisných šířkách může zimní blesková činnost představovat určitou hrozbu).

Cílem jakéhokoliv systému ochrany před bleskem je snížit riziko škod na únosnou míru. Únosná míra je založena na přijatelném riziku, jedná-li se o bezpečnost osob. Neuvažuje-li se bezpečnost osob nebo riziko škod je nižší než přijatelné riziko bezpečnosti osob, pak jsou všechny analýzy čistě na ekonomickém základu. Tato úvaha se provede pomocí ohodnocení ceny systému ochrany před bleskem ve srovnání s vyčíslením škody, které se předejde.

Norma IEC 61024-1 a technická zpráva IEC 61662 obě zahrnují některé informace týkající se výpočtu rizika škod způsobených bleskem staveb. Informace obsažené v citovaných publikacích jsou soustředěny níže a používány pro doložení některých důležitých záležitostí specifických pro rizika spojená s větrnými elektrárnami. Analýzy mají ale omezené použití a nehodí se jako pracovní příklad. Je možné použít plného znění uvedených norem.

5.2 Ohodnocování četnosti úderu blesku do větrné turbíny

Zprvce se u každé analýzy rizika blesku vypočítá četnost úderů blesků. IEC 61024-1 uvádí postup jak se vypočítá četnost úderů blesků. Hodnotí-li se četnost úderů blesků do konstrukce, je nutné znát data zpřesňující lokální četnost úderů blesku do země N_g . Není-li četnost úderů blesku do země známá, vypočítá se pomocí následujícího vztahu:

$$N_g = 0,04 \times T_d^{1,25} \quad (1)$$

kde

N_g je roční průměrná četnost úderů blesku do země na km^2

T_d je počet bouřkových dní za rok získaný z izokeraunických map (většinou jsou dostupné u národních meteorologických organizací)

Průměrná roční četnost přímých úderů blesků do konstrukce ve vypočítá z rovnice:

$$N_d = N_g \times A_d \times C_d \times 10^{-6} \quad (2)$$

kde

N_d je průměrný roční počet přímých úderů blesků do konstrukce

N_g je roční průměrná četnost úderů blesku do země na km^2

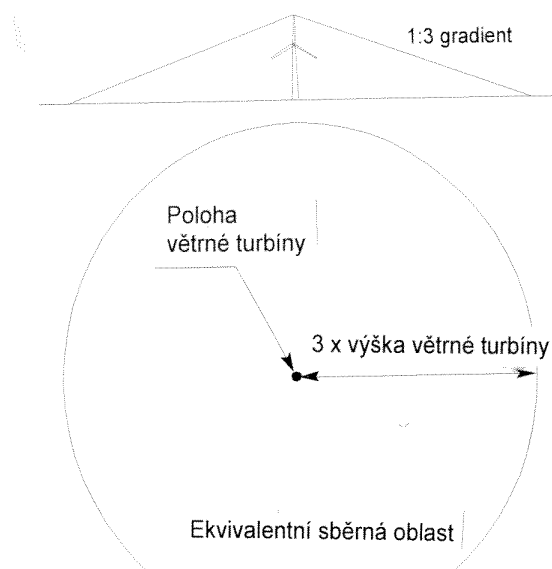
A_d je ekvivalentní sběrná oblast pro přímé úderu blesků do konstrukce

C_d je činitel prostředí. Vhodné hodnoty jsou $C_d = 1$ pro VE umístěná na rovině a $C_d = 2$ pro VE umístěná na kopci nebo vyvýšenině.

Ekvivalentní sběrná oblast pro přímé úderu blesků do konstrukce je definována jako oblast na povrchu země, která má stejnou četnost přímých úderů blesku jako konstrukce. U izolovaných konstrukcí je sběrnou oblastí pro přímé úderu blesků plocha určená průnikem povrchu země a přímkou se sklonem 1:3, která prochází z vrchních částí této konstrukce (dotýká se tam konstrukce) a otáčí se kolem ní.

Doporučuje se, aby všechny větrné elektrárny byly modelovány jako vysoký stožár s výškou rovnou výšce středu vrtule plus poloměr rotoru. Toto platí u větrných elektráren všech typů lopatek včetně lopatek pouze z nevodivého materiálu, jako je sklolaminát.

Na obrázku 16 je zobrazena ekvivalentní sběrná oblast větrné elektrárny umístěné na rovině. Samozřejmě se jedná o kruh s poloměrem rovným trojnásobku výšky větrné elektrárny.



Obrázek 16– Ekvivalentní sběrná oblast větrné elektrárny

Proto je možné použít následující rovnice, která stanovuje počet úderů blesku do větrné elektrárny umístěné na rovině.

$$N_d = N_g \times 9 \pi h^2 \times 10^{-6} \quad (3)$$

kde

h je výška větrné elektrárny v metrech

IEC 61024-1 obsahuje návod, jak hodnotit sběrnou oblast u VE v složitém terénu nebo v blízkosti jiných staveb.

5.3 Použití IEC 61024-1-1

Jakmile se odhadne četnost úderů blesků do stavby, musí se zvolit vhodná ochrana před bleskem. Porucha systému ochrany před bleskem má za následek tzv. kritickou událost. Pokud porucha systému ochrany před bleskem může mít za následek ztrátu lidského života, musí být dovolený roční počet kritických událostí stanoven národním nebo místním regulačním úřadem. Jsou-li všechny ztráty vyplývající z působení blesku čistě v ekonomické úrovni, stanoví dovolený roční počet kritických událostí vlastník stavby.

Dovolený roční počet kritických událostí je obecně různý podle užití stavby, konstrukce, jejího umístění a průměrného počtu osob uvnitř a v blízkosti stavby v dané době.

IEC 61024-1-1 stanoví, že dovolený roční počet kritických událostí (N_c) musí být větší nebo rovný výsledku rovnice (4):

$$N_c \geq N_d \times (1 - E) \quad (4)$$

kde

E je účinnost systému ochrany před bleskem

N_d je průměrný roční počet přímých úderů blesků do konstrukce

N_c je dovolený roční počet kritických událostí

Účinnost systému ochrany před bleskem je součinem dvou jednotlivých účinností, účinnosti zachycení (schopnosti zachytit úder) a účinnosti dimenzování (schopnost odvést bleskový proud). Tento koncept je převzat z IEC 61024-1. Minimální účinnost systému ochrany před bleskem se může vypočítat z rovnice:

$$E \geq 1 - \frac{N_c}{N_d} \quad (5)$$

POZNÁMKA V novém znění IEC 61024-1 (probíhá revize) je E definována:

$$E \geq 1 - R_a / R_d \quad (6)$$

kde

R_d je riziko poškození

R_a je přijatelné riziko poškození

IEC 61024-1 definuje 4 úrovně systémů ochrany před bleskem, úroveň I až IV (viz tabulka 9).

Tabulka 9 – Hladiny systémů ochrany před bleskem

Hladiny ochrany	účinnost zachycení E_i	účinnost dimenzování E_s	Účinnost $E = E_i \times E_s$
I	0,99	0,99	0,98
II	0,97	0,98	0,95
III	0,91	0,97	0,90
IV	0,84	0,97	0,80

Z fyzikálního hlediska účinnější systém ochrany před bleskem bude mít větší průměr svodu a rozsáhlejší uzemňovací soustavu (zlepšení účinnosti dimenzování) a bude navržen se zvýšeným množstvím a nebo sníženou vzdáleností jímáčů blesků (zvýšení účinnosti zachycení). Proud, specifická energie, strmost nárůstu proudu a hladiny přeneseného náboje požadované pro různé hladiny účinnosti dimenzování systému ochrany před bleskem jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10 – Maximální hodnoty parametrů blesku odpovídající hladinám ochrany

Hladiny ochrany	Vrcholový proud KA	Specifická energie KJ/Ω^{-1}	Průměrná strmost proudu $\text{kA}/\mu\text{S}$	Celkový přene- sený náboj C
I	200	10 000	200	300
II	150	5 600	150	225
III	100	2 500	100	150
IV	-	-	-	-

Systém ochrany před bleskem u hladiny I musí například schopen odolat bez poškození vrcholovému proudu 200 kA.

Příklady

Uvažujme VE s výškou středu vrtule 60 m a průměrem rotoru 60 m. Je umístěna v rovině s roční průměrnou hustotou úderů blesku do země 0,2 na km^2 . Dovolený roční počet kritických událostí je 1 ze 100 000* (obvyklá úroveň ve Velké Británii). Činí-li přítomnost obsluhy ne více než 1 % za rok, může se dovolený počet kritických událostí přepočítat jedním procentem na 1 z 1000**. Nejprve se musí určit četnost úderů blesků.

$$N_d = N_g \times 9 \pi h^2 \times 10^{-6} \quad (7)$$

$$N_d = 0,2 \times 9 \pi 90^2 \times 10^{-6}$$

$$N_d = 0,046/\text{rok}$$

*správněji: 0,00001 kritické události za rok, tzn. 1 kritická událost za 100 000 let

** správněji: 0,001 kritické události za rok, tzn. 1 kritická událost za 1000 let

Účinnost systému ochrany před bleskem musí být taková, že za rok nedojde k více než k jedné z 1000 kritických událostí***. Pak požadovaná účinnost systému ochrany před bleskem může být vypočtena z:

$$E \geq 1 - \frac{N_c}{N_d} \quad (8)$$

$$E \geq \left(1 - \frac{10^{-3}}{0,046}\right) \times 100 \%$$

$$E \geq 97,8 \%$$

***správněji: za rok dojde k 0,001 kritických událostí, neboli k jedné kritické události za 1000 let.

V této lokalitě a s účinností systému ochrany před bleskem 97,8 % a měl by tedy být instalován systém ochrany před bleskem s hladinou I.

5.4 Použití IEC 61662 (IEC 62305-2)

Zatím co IEC 62305-1 umožňuje stanovit hladinu systému ochrany před bleskem pro příslušný objekt, použitím technické zprávy IEC 62305-2 se může provést více přesných analýz systému ochrany před bleskem, které se vyžadují u budov.

IEC 61662 (IEC 62305-2) umožňuje stanovit riziko škody pro přímý úder blesku nebo nepřímý úder (magnetická vazba, přenesené přepětí) z hlediska bezpečnosti nebo ceny. Obdobným způsobem se v IEC 62305-1 riziko vypočítává pro stavbu a srovnává se s hladinou přijatelného rizika. Překročí-li vypočtené hladina rizika hladinu přijatelného rizika, musí být zlepšen systém ochrany stavby před bleskem. Je to zejména tehdy, jedná-li se o riziko ohrožení lidského života.

Maximální cena systému ochrany před bleskem může také vyplývat z porovnání ročních nákladů na jeho instalaci a provoz s ročními náklady na škody způsobené bleskem, kterým systém ochrany zabráni. Tyto druhy analýz mohou být použity v případě nulového rizika ohrožení života nebo v případě, že bylo prokázáno, že toto riziko je v přijatelných mezích.

V případě VE může být norma použita následovně. Škody způsobené přímým úderem blesku, které vzniknou při úderu blesku do VE, mohou mít jednu nebo více následujících forem:

- zranění/smrt osob způsobené extrémními krokovými nebo dotykovými napětími, úlomky konstrukce, výbuchem a požárem;
- požáru/výbuchu následným po jiskření na vnitřních kovových částech;
- poškození elektroniky větrné turbíny přepětím;
- poškození lopatek².

² Do výpočtu se zakalkuluje typ škody, ale není obsažen v základních případech IEC 61662. Doporučuje se také postupovat podle IEC 62305-2.

Škoda způsobená přímým úderem blesku je vždy úměrná četnosti úderů blesků, kterým bude konstrukce vystavena. Oproti tomu ke škodě způsobené nepřímým úderem blesku dojde tehdy, udeří-li blesk do blízkého objektu nebo do země. Škody mohou být:

- požár/výbuch způsobené jiskřením v připojených vedeních;
- škoda způsobená přepětím vyvolaným nárůstem potenciálu na připojených vedeních;
- požár/výbuch a škoda způsobená přepětím vyvolaným nárůstem potenciálu prvků ve VE v důsledku vazby na magnetické pole.

Četnost nepřímých škod je závislá na počtu blízkých úderů blesku a počtu blesků, které mají vliv na připojená vedení.

Je-li celková četnost škod bleskem vyšší než přípustná hladina, musí se nainstalovat lepší systém ochrany před bleskem. Jakmile se sníží četnost škod způsobených bleskem, které mají za následek ztráty na životech pod přijatelnou četnost, má se provést celková analýza nákladů. Roční náklady na všechny systémy ochrany před bleskem c_{am} nemá překročit roční náklady na škody způsobené bleskem (četnost škod způsobených bleskem se násobí náklady). Výpočet se provede podle rovnice

$$c_{am} < F_{total} \times C_l \quad (9)$$

kde

F_{total} je roční četnost škod

c_l je průměrná náklad na jednu škodnou událost způsobenou bleskem

Roční náklady na systém ochrany VE před bleskem se mohou vypočítat podle rovnice 10 v IEC 61662. Tato rovnice souvisí s celkovými náklady na systém ochrany VE před bleskem c_{pm} (během životnosti VE), ročními náklady na amortizaci a , úroky i a stupněm údržby m . Dosazením do rovnice 9 se dostaneme k rovnici 11, podle níž se stanoví maximální objem financí který může být ekonomicky použit na systém ochrany VE před bleskem.

$$c_{am} = c_{pm}(a + i + m) \quad (10)$$

$$c_{pm} < \frac{F_{total} \times c_{losses}}{(a + i + m)} \quad (11)$$

kde

c_{pm} jsou celkové náklady na systém ochrany VE před bleskem

a jsou ročními náklady na amortizaci

i jsou úroky

m je stupeň údržby

Tato výpočetní metoda nezahrnuje aplikaci daných hladin přijatelného rizika, ale je založena pouze na ekonomických analýzách.

Ačkoliv jsou náklady na škody lopatek odlišné od nákladů na škody systémů řízení, navrhuje se, aby se odhadly náklady na ochranu jednou pro systém ochrany lopatek a jednou pro systém řízení. V obou případech je četnost škod bleskem různá stejně jako budou různé předpokládané náklady na různé škody. Dále je uveden příklad této analýzy.

5.5 Analýza nákladů na systém ochrany lopatek před bleskem

Uvažujme VE z minulého příkladu s výškou středu vrtule 60 m a průměrem rotoru 60 m. Očekávaná roční četnost úderů blesků je 0,046. Předpokládejme, že všechny údery blesků do větrné turbíny zasáhnou lopatky. U turbíny, která nemá ochranu lopatek můžeme předpokládat, že každý úder blesku způsobí vážné poškození lopatek, které si vyžádá jejich výměnu.

Pokud bychom postupně zvyšovali účinnost systému ochrany před bleskem, bude každé 1 % účinnosti znamenat snížení škod způsobených bleskem.

$$N_p = N_d \times 0,01 \quad (12)$$

$$N_p = 0,046 \times 0,01 = 0,00046 \text{ rok}^{-1}$$

kde

N_p je očekávaný roční počet poruch lopatek, kterému bude zabráněno 1 % účinností systému ochrany lopatek před bleskem

Každé 1 % zvýšení účinnosti systému ochrany před bleskem bude znamenat snížení ročního počtu poruch lopatek. To znamená úsporu spojenou s tímto snížením škod :

$$c_u = N_p \times c_s \quad (13)$$

Kde

c_u je úspora nákladů ze snížení roční četnosti škod způsobených bleskem

c_s jsou náklady spojené s výměnou lopatky po úderu blesku

Náklady na poškození lopatky mohou představovat procenta z ceny turbíny. Činí-li náklady na každou lopatku 5 % z ceny turbíny, pak je možné vypočítat:

$$c_{\bar{u}} = N_p \times c_s \quad (14)$$

$$c_{\bar{u}} = 0,00046 \times 0,05 \times c_t$$

$$c_{\bar{u}} = 0,023 \times c_t \times 10^{-3}$$

kde c_t je cena větrné turbíny

Instalace systému ochrany lopatek proti blesku je ekonomická, jsou-li roční náklady na systém po celou dobu životnosti turbíny nižší než úspora nákladů, která vyplývá z instalace tohoto systému. Toto se může vyjádřit.

$$c_{pm} < \frac{c_{\text{saved}}}{(a + i + m)} \quad (15)$$

Po dosazení za $a = 4 \%$, $i = 8 \%$ a $m = 1 \%$ dostaneme :

$$c_{pm} < \frac{0,023 \times c_t \times 10^{-3}}{(a + i + m)} \quad (16)$$

$$c_{pm} < 0,18 \times c_t \times 10^{-3}$$

Dostáváme tak vyjádření maximálních nákladů na 1 % účinnost systému ochrany lopatek před bleskem jako funkci nákladů na turbínu.

$$\frac{c_{pm}}{c_t} < 0,018\% \quad (17)$$

Tato rovnice ukazuje, že maximum nákladů na 1 % účinnosti systému ochrany lopatek před bleskem je 0,018 % z celkové ceny turbíny. Je možné vyvodit, že instalace hladiny II (95 % účinnost) může stát maximálně 1,7 % z celkové ceny turbíny v oblasti s relativně nízkou roční četností úderů blesků do země 0,2 úderů /km².

5.6 Analýza nákladů na ochranu řídicího systému VE před bleskem

Na rozdíl od poškození lopatek turbíny je poškození systémů řízení způsobeno více příčinami, jak přímými, tak nepřímými. Z důvodů větší složitosti a rozlehlosti systémů řízení turbíny je velmi obtížné provést analýzy nákladů na jejich ochranu před bleskem.

Vezměme jako příklad výše uvažovanou turbínu. VE je ročně zasažena 0,046 přímých úderů blesku. Počet nepřímých úderů, které zapůsobí na turbínu, je ovšem mnohem vyšší. VE se nachází v oblasti s rezistivitou půdy 250 Ωm. Z VE jsou vyvedeny silové kabely a kovové sdělovací kabely systému SCADA do elektrické stanice vzdálené 1 km.

IEC 61662 uvádí, že tato vedení budou exponována velkým počtem úderů blesku do země. Průměrný roční počet úderů blesku ovlivňujících tato vedení N_k lze určit takto:

$$N_k = N_g \times A_k \times 10 \quad (18)$$

kde

A_k je plocha vlivu na vedení v km², zahrnuje vlastní prostor vedení a efektivní prostor všech sousedních konstrukcí napojených na uvažované vedení

Postup pro určení A_k je uveden v IEC 61662. V daném příkladě má silový kabel plochu vlivu 0,05 km² a sdělovací kabel plochu vlivu 1 km². Celkový počet úderů blesků ovlivňujících toto vedení je proto 0,01 a u

sd kabelu 0,02. V porovnání s odhadovanou roční četností blesků 0,046 za rok je zřejmé, že sd kabely jsou vystaveny 4 krát více bleskům než vlastní VE. Používají-li se optické kabely s nekovovým pláštěm, snižuje se počet úderů blesků k nule.

V dodatku 1 je uveden mechanismus související s vlivem vazby magnetickým polem. Výsledkem je, že poškození systému řízení VE může nastat častěji, než poškození lopatek turbíny.

Z předešlých analýz poškození lopatek vyplývalo, že náklady na systém ochrany před bleskem byly úměrné četnosti a nákladům na škody. U systémů řízení VE se četnost poškození zvyšuje ve srovnání s poškozením lopatek, ale náklady na takovou škodu klesnou. Vliv na maximální částku, která může být vynaložena ekonomicky na 1 % účinnosti systému ochrany před bleskem u systému řízení VE bude záviset na přesném uspořádání VE, a to je problém, který přesahuje rámec této normy.

6 Ochrana lopatek VE před bleskem

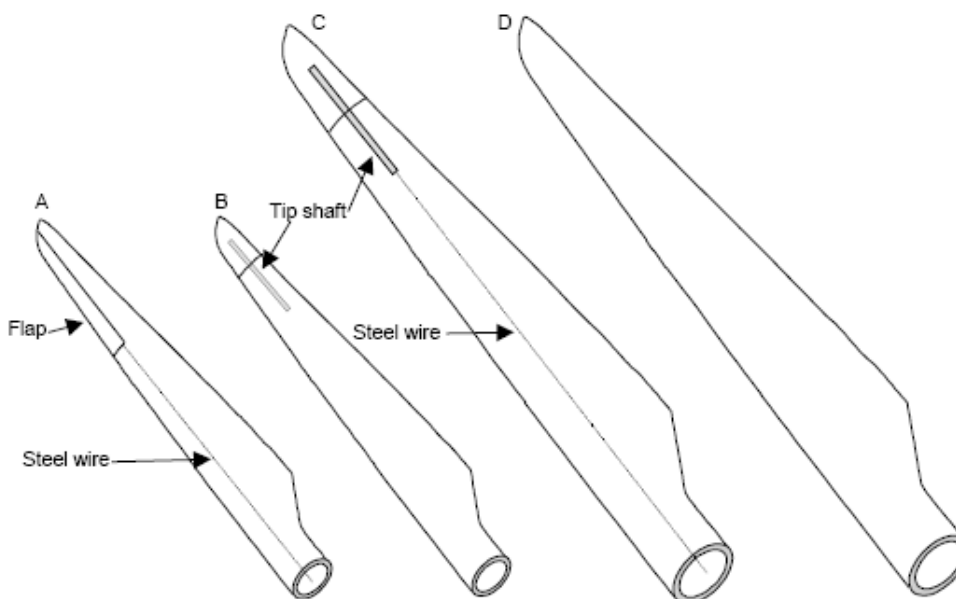
6.1 Složení lopatek

Moderní VE mají dlouhé duté lopatky z kompozitních materiálů, jako je sklolaminát, dřevo, dřevolaminát a plasty s uhlíkovými vlákny. Pasty s uhlíkovými vlákny se obvykle používají pro vyztužení konstrukce lopatek nebo na speciální části, jako jsou vrcholová hřídel u lopatek s brzdami (brzdny mechanismus na přetížení). Některé části a samostatné prvky, jako jsou montážní příruby, vyrovnávací závaží, čepy, ložiska, vedení, elektrická instalace, pružiny a příslušenství, jsou kovové. U některých částí se předpokládá, že blesky neudeří do lopatek vyrobených pouze z nevodivého materiálu, ale zkušenosti z praxe jasně dokazují, že to není pravda. Blesky ve skutečnosti udeří do lopatek bez kovových částí a kdykoliv vznikne oblouk v lopatce, dojde k jejímu vážnému poškození.

Dvě strany nebo povrch lopatky se obvykle vyrábí samostatně jako povlak ze sklolaminátu nebo jiných kompozitních materiálů slepený podélně a odtokové hrany a vnitřní nosné konstrukce jsou také vyrobeny ze sklolaminátu. Uvnitř lopatky se nachází dlouhé vzduchové dutiny zformované tenkým povlakem a vnitřní konstrukce a konstrukce napínající lopatku po celé délce.

Existuje několik druhů lopatek v závislosti na použitém systému řízení a brždění. Na obrázku 17 jsou zobrazeny hlavní druhy lopatek.

Typ A používá brzdící klapku ve vnější části náběhové hrany. U lopatek typu A se bod, do kterého obvykle udeří blesk, nachází na zavěšení kovové klapky a často dochází k vážnému poškození, protože průřez ocelových vodičů používaných pro ovládání klapky je obvykle nedostatečný pro vedení bleskového proudu.



Obrázek 17– Typy lopatek VE

Lopatky typu B používají brzdy ve špičce, které jsou přidržovány pomocí pružiny a uvolňovány odstředivou silou při extrémní rychlosti otáčení. U lopatky typu B se bod, do kterého obvykle udeří blesk, nachází několik desítek cm od nejvzdálenějšího vrcholu nebo na stranách vrcholu v pozici nejvzdálenějšího konce vrcholového hřídele. Z místa úderu se formuje oblouk lopatkou směrem dolů k ocelové přírubě na patce lopatky. Vnitřní oblouky tak způsobují katastrofické destrukce lopatky. Lopatky typu A a B se používaly u starších VE do výkonu 100 kW.

Lopátka typu C je moderní typ s brzdou ovládanou ocelovým drátem. U lopatky typu C se bod, do kterého obvykle udeří blesk, nachází několik desítek cm od nejvzdálenějšího vrcholu nebo na stranách vrcholu v pozici nejvzdálenějšího konce vrcholového hřídele. Jak u lopatky typu B, tak typu C oblouk, který se formuje ve vrcholové sekci mezi místem úderu a nejvzdálenějším koncem hřídele způsobuje vážné škody. Na lopátkách typu C je poškození lopatky nejviditelnější v případě, že ocelový drát není schopen vést bleskový proud. U 17 m lopatky se používají ocelové dráty o minimálním průměru 10 nebo 12 mm. Tyto dráty jsou schopné přenést bleskový proud, a proto chrání lopatku od poškození (viz 6.5).

Lopátka typu D je celá z nevodivých materiálů. Jako u ostatních typů lopatek nachází se bod, do kterého obvykle udeří blesk blízko vrcholu. Na rozdíl od ostatních typů lopatek se mohou body úderů také nacházet náhodně rozmístěny po celé délce lopatky.

Údery blesku do nevodivých lopatek mohou být přinejmenším vysvětleny tak, že znečištění a voda způsobují časem vodivost lopatek. Pokusy v laboratoři ukázaly, že postříkáním lopatky solným roztokem se nevodná lopátka stává stejně náchylná na oblouk jako kovová lopátka. Jiný výklad vychází z toho, že lopatky jsou prostě v cestě úderu blesku do věže VE. Kromě toho je známo, že se výboje rozvíjejí podél povrchu snadněji, než ve vzduchu. Ve všech případech ukazují praktické zkušenosti, že je docela běžné vážné poškození nevodivých lopatek (typ D) bleskem.

6.2 Mechanismus poškození lopatky

Typy poškození v místech úderu blesku jsou, rozštípnutí a popálení povrchu kompozitního materiálu a zahřátí nebo roztavení kovových součástí.

K nejvážnějšímu poškození lopatek VE dojde, když prochází oblouk vnitřkem lopatky. Oblouky se mohou tvořit ve vzduchových mezerách v lopatce nebo po vnitřním povrchu lopatky. Další typ poškození vzniká průchodem bleskového proudu nebo jeho částí vrstvami kompozitních materiálů pravděpodobně proto, že vrstvy obsahují nějakou vlhkost. Tlakové vlny způsobené vnitřními oblouky mohou způsobit doslova explozi lopatky, roztržení povrchu lopatky podél hran a od vnitřních nosných částí. Stupně poškození je možné rozdělit od roztržení povrchu až do celkové deformace lopatky. V některých případech se tlakové

vlny od úderu blesku do lopatky šíří středem vrtule a do dalších lopatek a způsobují v nich poškození tlakem.

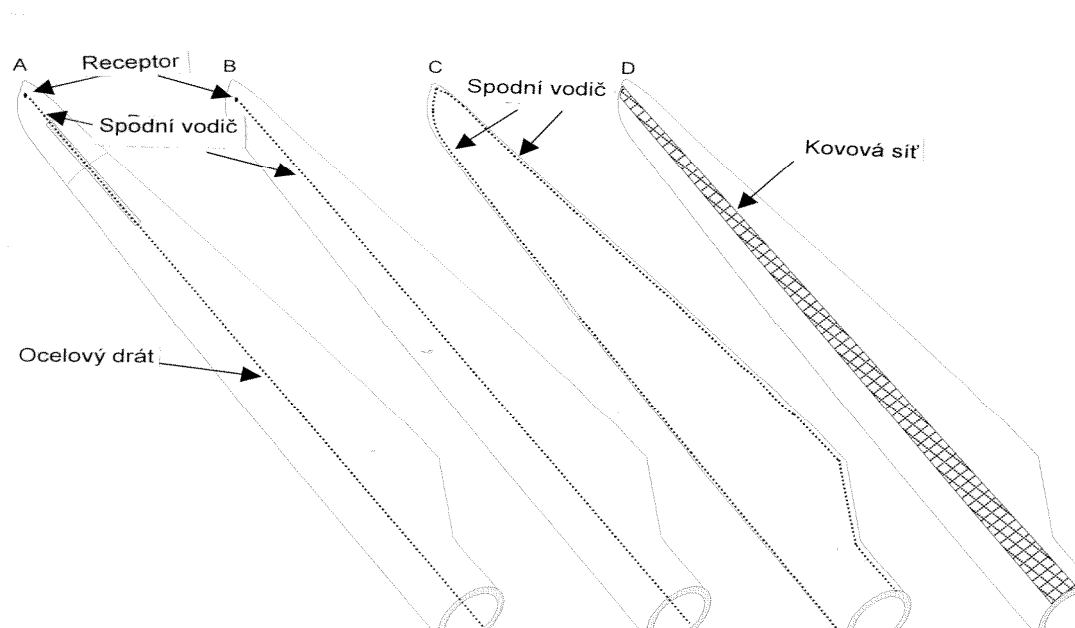
Vnitřní oblouky se často tvoří mezi bodem, do kterého udeří blesk na vrcholu lopatky, a nějakou vodivou součástí v lopatce. U lopatky typu C je poškození často omezeno na vrcholovou oblast, zatímco hlavní část lopatky zůstává nepoškozena. K poškození hlavní části lopatky typu C dochází obvykle při vnitřním oblouku. Obvykle se to stává tehdy, má-li ovládací drát vrcholové brzdy nedostatečný průřez pro vedení bleskového proudu z vrcholu lopatky do středu vrtule. U lopatky typu A dojde ke zničení hlavní části lopatky.

Vážné poškození lopatek větrné turbíny je způsobeno šířením tlakové vlny oblouku vnitřkem lopatky vyvolaného úderem blesku. Nepodstatná poškození mohou nastat šířením oblouku způsobeného úderem blesku po vnějším povrchu lopatky, nebo je-li bleskový proud veden kovovými součástmi o nedostatečném průřezu.

6.3 Ochrana proti blesku lopatek větrné turbíny

6.3.1 Základní problém

Základním problémem ochrany lopatek proti blesku je bezpečné odvedení bleskového proudu z místa úderu do středu vrtule takovým způsobem, aby bylo znemožněno šíření oblouku uvnitř lopatky. Toho se může dosáhnout odvedením bleskového proudu z povrchu patky lopatky pomocí kovových vodičů buď umístěných na povrchu, nebo uvnitř lopatky. Jiná metoda je založena na dodání vodivého materiálu do vlastního materiálu povrchu lopatky tak, že se stane dostatečně vodivým k bezpečnému vedení bleskového proudu do patky lopatky. U lopatek větrné turbíny se používá kombinace obou metod (viz obr. 18).



Obrázek 18– Ochrana před bleskem u dlouhých moderních lopatek VE

6.3.2 Jímací (bleskosvodové) systémy na povrchu lopatky nebo zabudované v povrchu lopatky

Kovové vodiče na povrchu lopatky, které slouží jako jímací systém nebo bleskosvodový systém musí mít dostatečný průřez, aby odolaly přímému úderu blesku a mohly vést celý bleskový proud. Dále se vyžadují určité rozměry vodičů, aby se docílilo jejich spolehlivého upevnění na povrchu lopatky. Minimální průřez u hliníku je 50 mm² a dosažení spolehlivého upevnění těchto vodičů není snadné. Kromě toho vodiče namontované na povrchu lopatky musí vyhovět požadavkům na aerodynamiku lopatky a nežádoucí hluk.

U vodičů zabudovaných v lopatce se používají dráty nebo pletence drátků buď z hliníku nebo z mědi. V literatuře jsou popsány různé systémy ochrany proti blesku, u kterých je vodič připojený na patku lopatky umístěn buď na povrchu lopatky podél odtokové hrany lopatky, nebo zapuštěný v odtokové hraně (typ C). Dále mají některé lopatky kovové bleskosvody obepínající dokola povrch lopatky v několika místech podél lopatky, všechny jsou připojeny k vodičům umístěným podél okrajů lopatky.

6.3.3 Přílnavé kovové pásy a svodové pásy

V některých pokusných případech se použily přílnavé kovové pásy umístěné na povrchu lopatky. Ale pásy mají tendenci se sloupat během několika měsíců. Za předpokladu, že problém trvalého přilnutí pásy na lopatku se vyřeší, je pravděpodobné, že použití kovové pásy se může stát zajímavou metodou, zejména pro stávající nechráněné lopatky. Je třeba ale poznamenat, že při průchodu oblouku v blízkosti povrchu lopatky vznikají na něm značné tlakové vlny, které mohou způsobit jeho strukturální poškození.

V poslední době bylo provedeno několik úspěšných experimentů se svodovými segmentovými pásy. Takové segmentové pásy se používají na krytech antén letadel, protože neovlivňují radarový signál. Ale zatím použití těchto pásků u VE nebylo popsáno.

Je možné, že kovový pás a svodové segmentové pásy se mohou používat jako jednorázová ochrana vyžadující výměnu po zasažení bleskem.

6.3.4 Systémy vnitřních bleskosvodných vodičů

Řešením problému umístění vodičů na povrchu lopatky je umístění vodičů do lopatky. Kovové úchyty vodiče pronikají povrchem lopatky a slouží jako oddělené receptory blesku. Takové systémy ochrany se používají v letadlech.

Současně vyráběné systémy ochrany před bleskem používané u mnoha lopatek mají také oddělené receptory blesku umístěné na vrcholu lopatky (typy A a B). Z receptorů na vrcholu vede vnitřní systém vodičů bleskový proud do patky lopatky. U lopatek s vrcholovou brzdou se ocelový vodič pro ovládání vrcholu lopatky používá jako vnitřní vodič (typ A). Nemají-li lopatky vrcholovou brzdu, potom se používá měděný drát umístěný podél vnitřního podélníku jako bleskosvodový vodič (typ B).

Během posledních let se vyrobilo několik tisíc lopatek se systémem ochrany proti blesku (typy A a B). První zkušenosti s ochranou lopatek o délce až 20 m jsou velmi nadějně. Ale dosud nejsou k dispozici dostatečné zkušenosti s lopatkami delšími než 20 m.

6.3.5 Vodivé povrchové materiály

Alternativou k bleskosvodnému systému umístěnému na povrchu je učinit povrch sám o sobě vodivý. V leteckém průmyslu se dosáhlo ochrany křídel ze sklolaminátu a uhlíkových kompozitních materiálů před bleskem přidáním vodivého materiálu do vrchních vrstev, tím se poškození redukuje na malou oblast v místě úderu blesku. Vodivý materiál může tvořit nastříkaný kov na povrchu, metalizovaná vlákna ve vrchních vrstvách kompozitního materiálu, kovová tkanina ve vrchních vrstvách kompozitního materiálu nebo kovové sítky umístěné těsně pod povrchem. Ochrana lopatek VE proti blesku se provádí pomocí ocelové sítky umístěné podél stran lopatek jen pod gelovým povlakem. Někdy je úplný vrchol lopatky buď z kovu nebo pokryt ocelovým pláštěm.

6.4 Účinnost zachycení

Účinnost zachycení je záležitost týkající se metod ochrany před bleskem používajících oddělených jímacích soustav umístěných na povrchu lopatky. Pevné vodiče a segmentové svodiče na povrchu a oddělené receptory prostupující povrchem se musí umístit takovým způsobem, aby byla na přijatelnou míru snížena pravděpodobnost zásahu blesku do nechráněných částí povrchu.

Rozmístění oddělených receptorů docilující účinnost zachycení stejnou jako u plných vodičů je teoreticky takové, kdy přeskokové napětí podél povrchu lopatky je nižší než průrazné napětí obalu lopatky. V praxi je obtížné stanovit obě napětí z důvodů rozdílů různých kompozitních materiálů, vlivem stárnutí, popras-

kání, vlhkosti a znečištění. Mimo to je účinnost zachycení segmentových receptorů a oddělených receptorů ovlivněna přítomností vodivých materiálů v lopatce. Například plné vodiče pro antény letadel jsou umístěny na povrchu ve vzájemné vzdálenosti od 30 do 60 cm, ale účinnost zachycení není 100 %, jak dokládají občasné průrazy antén letadel.

Vodiče umístěné v dielektrickém krytu jsou z mechanických důvodů připevněny každých 15 cm sponami, který vyčnívají z povrchu a slouží jako receptory.

U lopatek s délkou do 20 m se zdá, že receptory na vrcholu lopatky jsou dostačující. Pro delší lopatky je nutné, aby lopatky měly více než jeden receptor, aby se docílilo požadované účinnosti zachycení. Při konstrukci jímacích systémů pro lopatky větrných turbín s délkou nad 20 m je nutné využít praktických zkušeností a výsledků výzkumu.

6.5 Rozměry materiálů

Materiály používané pro ochranu lopatek větrných turbín před bleskem musí odolat elektrickým, tepelným a elektrodynamickým namáháním způsobeným bleskovým proudem. Minimální průřezy materiálů jímáčů a svodů jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11 – Minimální průřezy materiálů systému ochrany před bleskem

Materiál	Jímače mm ²	Svody mm ²
Měď	35	16
Hliník	70	25
Ocel	50	50

Dále - dimenzování, které vezme v úvahu elektrické i elektromagnetické účinky a předvídatelná náhodná namáhání připravuje IEC TC81, jak ukazuje tabulka 12.

V tabulce 12 jsou uvedeny průřezy, které respektují elektrické a elektrodynamické namáhání. Předvídatelná náhodná namáhání řeší TC 81.

Tabulka 12 – Doporučené minimální průřezy materiálů systému ochrany před bleskem

Materiál	Konfigurace	Minimální průřez mm ²
Měď	Plná páska	50
	Plné kruhová	50
	Lanko	50
	Plná kruhová pro jímací tyče	200
Hliník	Plná páska	70
	Plné kruhová	50
	Lanko	50
Slitina hliníku	Plná páska	50
	Plné kruhová	50
	Lanko	50
	Plná kruhová pro jímací tyče	200
Ocel pozinkovaná v ohni	Plná páska	50
	Plné kruhová	50
	Lanko	50
	Plná kruhová pro jímací tyče	200
Nerezová ocel	Plná páska	60
	Plné kruhová	78
	Lanko	70
	Plná kruhová pro jímací tyče	200

Součásti pod zatížením, jako jsou ocelové dráty vrcholových brzd, musí být pevnější, protože jejich mechanická pevnost se působením vysokých teplot snižuje. Existují zkušenosti s ocelovými dráty používanými na ovládání vrcholových brzd, které ukazují, že dojde průchodem bleskového proudu dráty o průměru do 10 mm (průřez 78 mm²) k jejich přetržení nebo roztavení. Následující rovnice uvádí rychlost oteplení vodičů vedoucí bleskový proud. Projektant musí uvažovat s oteplením všech součástí vystavených bleskovému proudu a zajistit, aby tyto součásti měly potřebnou pevnost, která umožní být plně funkční i po úderu blesku.

$$\theta - \theta_0 = \frac{1}{\alpha} \times \left\{ \exp \left[\frac{(W/R \times \alpha \times \rho_0)}{q^2 \times \lambda \times c_w} \right] - 1 \right\} \quad (19)$$

kde

$\theta - \theta_0$ je oteplení vodičů (K)

α je odporový teplotní koeficient (1/K)

W/R je specifická energie proudového impulsu (J/Ω)

ρ_0 je resistivita vodiče při teplotě okolí (Ωm)

q je průřez vodiče (m²)

γ je měrná hmotnost materiálu (kg/m³)

c_w je tepelná jímavost (J/kgK)

V tabulce 13 jsou uvedeny vstupní hodnoty do této rovnice pro běžné materiály a v tabulce 14 je uvedeno oteplení u různých vodičů. Je třeba poznamenat, že v případě předpjatých drátů nesmí dosáhnout oteplení bodu tavení.

Tabulka 13 – Fyzikální charakteristiky typických materiálů používaných v systému ochrany před bleskem

Veličina		Materiál			
		Měď	Hliník	Měkká ocel	Nerezová ocel ^a
ρ_0	Ωm	17,8 x 10 ⁻⁹	29 x 10 ⁻⁹	120 x 10 ⁻⁹	0,7 x 10 ⁻⁶
α	1/K	3,2 x 10 ⁻³	4,0 x 10 ⁻³	6,5 x 10 ⁻³	0,8 x 10 ⁻³
γ	g/m ³	8 920	2 700	7 700	8 000
θ_0 (bod tavení)	°C	1 080	658	1 530	1 500
c_s	J/kg	209 x 10 ³	397 x 10 ³	272 x 10 ³	-
c_w	J/kgK	385	908	469	500

^a Austenitická nemagnetická

Tabulka 14 – Oteplení(K) u různých vodičů jako funkce W/R

Průřez mm ²	Materiál											
	Hliník			Ocel			Měď			Nerezová ocel		
	W/R			W/R			W/R			W/R		
	MJ/Ω			MJ/Ω			MJ/Ω			MJ/Ω		
	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10	2,5	5,6	10
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	564	-	-	-	-	-	169	542	-	-	-	-
16	146	454	-	1120	-	-	56	143	309	-	-	-
25	52	132	283	211	913	-	22	51	98	940	-	-
50	12	28	52	37	96	211	5	12	22	190	460	940
100	3	7	12	9	20	37	1	3	5	45	100	190

6.6 Připojení lopatky k ose vrtule

V patce lopatky je systém svodu obvykle zakončen buď na montážní přírubě lopatky nebo na vrtulové hlavě.

Má-li lopatka regulaci sklápěním (typ D), umožňuje se, aby bleskový proud procházel nekontrolovaně buď ložiskem sklápěcího systému nebo nějakým druhem pospojování napříč ložiskem, provedeným jako kluzný kontakt nebo s dostatečně volným ohebným kabelem pospojování, který umožňuje naklápěcí pohyb. Ohebné pospojení přes ložisko se může kombinovat s nejnvnitřnější částí svodu z lopatky.

Má-li lopatka vrcholovou brzdu (typ C), musí se chránit hydraulický systém, který pohání ovládací drát. Normalizované hydraulické válce, které se obvykle používají, mohou být poškozeny výboji z tyče na skříň válce. Obvykle je hydraulický válec chráněn bleskosvodem přes ohebný spojovací pásek s dostatečnou vůlí umožňující pohyb.

U takových pospojovacích pásků se musí věnovat pozornost snížení vůle, protože indukovaný úbytek napětí na pásku může být dost vysoký, mající za následek nedostatečnou ochranu válce.

6.7 Uhlíkový laminát (CRP)

Uhlíkový laminát (CRP) se hodně používá na vrcholové hřídele a v některých případech i na výztuhu lopatek. Očekává se značné rozšíření používání CRP pro větší lopatky (nad 20 m).

Vodivost materiálů CRP velmi závisí na orientaci vláken. Ačkoliv jsou uhlíková vlákna elektricky vodivá, materiál CRP, který má vrstvy uhlíkových vláken fixovány v matici, má vodivost 1 000 krát menší než hliník. Proto odporový ohřev CRP vedením proudu je velmi vysoký a plyny vznikající v materiálu se odpařují při 200 °C. Tlak vyvíjený odpařujícími se plyny může způsobit trhlinu a rozštěpení vrstev. U CRP může dojít ke spálení, zejména v místě úderu blesku.

V letadlech, která CRP používají je povinné, že pro prvky s CRP je zajištěna ochrana před bleskem těch prvků, do kterých může udeřit blesk nebo může jimi procházet bleskový proud.

Jsou známy případy, kdy vrcholové hřídele z CRP u větrných turbín byly poškozeny bleskem. Některé experimenty v laboratoři prokázaly také nebezpečí poškození tohoto hřídele bleskovým proudem. Laboratorní zkoušky lopatek s CRP povrchem vykazovaly známky rozštěpení a spálení v místě úderu blesku.

CRP se má považovat za vodič, a proto musí být provedeno řádné pospojení mezi CRP a ostatními vodičnými prvky. Rozměrné součásti z CRP mají být schopné vést bleskový proud bez poškození. Je třeba, aby se prováděl výzkum a vývoj vhodných materiálů, které budou schopny vést bleskový proud nejen pro větrné elektrárny.

6.8 Vedení uvnitř lopatek

Vedení pro snímače umístěné v lopatkách se musí chránit vhodným ekvipotenciálním pospojováním se svodovou soustavou. Vedení je tvořeno buď stíněnými kabely nebo je umístěno v kovových trubkách. Stíněné kabely nebo ocelová trubka se mají umístit v blízkosti, jak je to jen možné, vodiče svodu a propojí se sním.

7 Ochrana ložisek a převodovky

7.1 Poškození ložisek AC a DC proudy

Je známo, že elektrické proudy způsobují poškození ložisek. Nejvíce zkušeností o tomto působení lze získat z elektrických strojů, které jsou součástí elektrického obvodu. Takové proudy způsobují během času poškození, i když proudová hustota je nižší než 2 A/mm². Při proudové hustotě 1,4 A/mm² se ložiska poškodí za několik tisíc provozních hodin a dokonce lze očekávat poškození i u hustoty 0,7 A/mm². Nejnižší limit, při kterém je pouze malé riziko poškození je okolo 0,1 A/mm². Další relativně dobře známé zdroje poškození jsou svařovací proudy a proudy zpětných elektrostatických výbojů procházející ložisky do země.

7.2 Poškození ložisek bleskovými proudy

Bleskový proud má velmi krátkou dobu trvání ve srovnání s výše uvedenými AC a DC proudy. Oblouk mezi oběžnou drážkou a rotujícími součástmi stačí rozptýlit svou energii tak, že nevznikne vážnější důlková eroze.

Praktické zkušenosti s poškozením ložisek bleskem u větrné turbíny jsou vzácné, protože nejsou obvykle tato ložiska po zásahu bleskem kontrolována. Je tedy obtížné určit příčinné souvislosti, protože někdy trvá léta, než se vada rozvine tak, aby byla patrná. Navíc u takového dlouhodobého poškozování rotačních částí ložiska a oběžných drážek není snadné prokázat, že bylo způsobeno bleskem, protože vytržený a přetavený materiál od oblouku je erodován více a více a je v ložisku semletý spolu s materiálem válečků a oběžných drážek. U většiny těchto případů následného poškození nebylo patrně nikdy prokázáno, že byly způsobeny bleskem.

Vyskytly se ovšem případy, u kterých se ukázalo, že blesk byl příčinou poškození. Zejména dva nebo tři příklady poškození VE na pobřeží by měly být zmíněny, protože vzbudily velkou pozornost a to nejen kvůli vysokým nákladům na opravu. V těchto případech byly VE zasaženy bleskem, který poškodil lopatky, a po určité době se projevilo vážné poškození hlavních ložisek. Opravy takových hlavních dílů jsou drahé a to zejména u VE na pobřeží.

Nedávno byly zasaženy bleskem 4 VE v Dánsku. Majitel - energetická společnost - rozhodl o demontáži 90 kW větrné turbíny zasažené bleskem za účelem kontroly ložisek. Tato větrná turbína nebyla uvedena po zásahu blesku do provozu, protože jedna lopatka byla kompletně poškozena a spadla na zem. Byla zjištěna důlková koroze a opotřebení do hloubky 3 mm u více jak 10 ze 46 válečků v ložisku. Podobný počet s obdobnými známkami poškození byl zjištěn na oběžných drážkách na přední straně hlavního ložiska. Výrobce ložisek následně odhadl, že takové poškození má za následek snížení životnosti na 1/3.

7.3 Výzkumy v laboratoři

Bylo provedeno několik výzkumů zabývajících se poškozením ložisek VE bleskovým proudem. V jednom výzkumu způsobil bleskový proud opotřebení v místech, kde vznikl oblouk mezi válečky a oběžnými drážkami. Poškození ložiska nastalo při proudových hustotách vyšších než prahová hodnota 4 kA/mm². Míra poškození se zvyšovala se vzrůstajícím mechanickým zatížením ložiska. Ložiska málo mechanicky zatížená vykazovala oddělenou (bodovou) důlkovou korozi a opotřebení, ale poškození se zvyšujícím se zatížením mělo formu rýh podél kontaktní oblasti mezi válečky a oběžnými drážkami. Při vyšších hodnotách proudu zůstávaly tvary rýh stejné, ale zvyšoval se rozsah roztaveného materiálu a poškozené oblasti. Bez ohledu na proudovou hustotu a zatížení bylo zjištěno, že promazáním ložiska se rozsah poškození snížil.

Další soubor výsledků byl získán z různých výzkumných pracovišť, kde se aplikovaly bleskové proudy do ložisek natáčení lopatek a ložisek generátoru. Provedly se stejné zkoušky na rotačních a stacionárních ložiscích generátoru a patrné poškození bylo pouze na rotačním ložisku. Příčinou poškození je oblouk mezi válečky a oběžnou drážkou v místech průrazu izolující hydrodynamické mazací vrstvy v rotačním ložisku.

Je zřejmé, že je nutné dále zkoumat mechanismy poškození ložisek. Sledování rozdělení bleskového proudu z náboje větrné turbíny do stožáru prokázalo, že 80 % aplikovaného impulsu bleskového proudu prochází nejvzdálenější ložiskovou hřídelí. Zbýlých 20 % je rozvedeno do druhé hlavní ložiskové hřídele, skříně převodovky a do generátoru.

7.4 Poškození převodovky

Kromě výše uvedeného příkladu, který dokumentuje, že část bleskového proudu protekla převodovkou, neexistuje dosud solidní evidence poškození převodovky bleskovým proudem. Dále jsou uvedeny případy, kdy byly poškozeny bleskovým proudem převodovky a ložiskové hřídele po zásahu blesku do lopatek větrné turbíny. Ale zatím nebylo určeno, je-li toto poškození způsobeno sekundárně vlivem poškození hlavního ložiska bleskovým proudem. V několika případech byla objevena důlková koroze v otevřených skříních převodovek, ale opět bylo obtížné určit příčinné souvislosti.

7.5 Ochrana před bleskem dílů ložisek a převodovek

Je možné, že velká silně zatěžovaná ložiska a stacionární ložiska mohou vést bleskový proud bez znetelného poškození. Proto ochrana pomaluběžných ložisek regulujících natáčení lopatek a ložisek pro vychylování není zřejmě nutná. V každém případě se doporučuje, aby byla zajištěna alternativní dráha proudu přes ložisko s rizikem poškození buď ohebným lankem, kluzným kontaktem nebo podobným způsobem.

Pokud se týká hlavních ložiskových hřídelí, skříně převodovky a ložisek generátoru, je obtížné sladit potřebu mazání za účelem snížení tření s dobrým kovovým kontaktem potřebným pro vedení bleskových proudů. Pokusy o snížení části bleskových proudů tekoucích ložisky hlavního hřídele poskytnutím náhradních proudových drah s kluznými kontakty, kartáči a jiskřišti provedlo mnoho výrobců. Velké kon-

strukce ložisek mají velmi malou impedanci, zatím co kluzné kontakty, kartáče nebo jiskřiště s propojením na lokální zem mají vyšší impedance. Proto takováto opatření nemohou odklonit celý bleskový proud od průchodu ložisky.

Někteří výrobci používají rozptylové prvky, jako jsou uhlíkové kartáče navržené na mnohem nižší úrovni proudu. Toto může mít za následek oblouk přes nebo skrz prvky, jsou-li vystaveny bleskovému proudu. Mimoto opotřebenění kartáčů může vyžadovat častou výměnu a spolu s uhlíkovými kartáči vznikne problém s uhlíkovým prachem.

Aby se snížil bleskový proud tekoucí ložisky, musí se bleskový proud odvést přes vodivou cestu o nízké impedanci a impedance konstrukce ložiska musí být zvýšena vložením odporové nebo izolační vrstvy někde v proudové dráze vedoucí ložiskem. Na obrázku 19 je uvedeno, jakým způsobem se může vytvořit alternativní proudová dráha z konce čela nízkorychlostní hřídele do základové desky (lokální zem) gondoly, když se současně vloží izolační vrstvy v celé proudové dráze ložisky, skříni převodovky a vysokorychlostní hřídele. Mnoho výrobců používá pružných spojek vložených do vysokorychlostní hřídele, které mohou také zajistit potřebnou izolaci a tím chránit generátor před bleskovými proudy tekoucími hřídelí generátoru.



Obrázek 19 - Alternativní proudová cesta na snížení bleskového proudu

Má se věnovat pozornost značným napětím, které mohou vzniknout během úderu blesku nebo elektrické poruše mezi izolovaným kanálem vedení pro pohon a základovou deskou gondoly a které mohou být nebezpečné pro obsluhu v gondole. Elektrické zařízení v kanále pohonu musí být proti těmto přepětím chráněno.

8 Ochrana elektrické soustavy a systému řízení

8.1 Úvod

8.1.1 Základní měření

V této kapitole je popsána základní elektrická soustava VE a systém řízení. Také je uvedena metodika definující zóny ochrany, která usnadní výběr a dimenzování vhodných opatření pro ochranu elektrických částí. Také jsou popsány metody stínění, pospojování a ochrana proti přepětí.

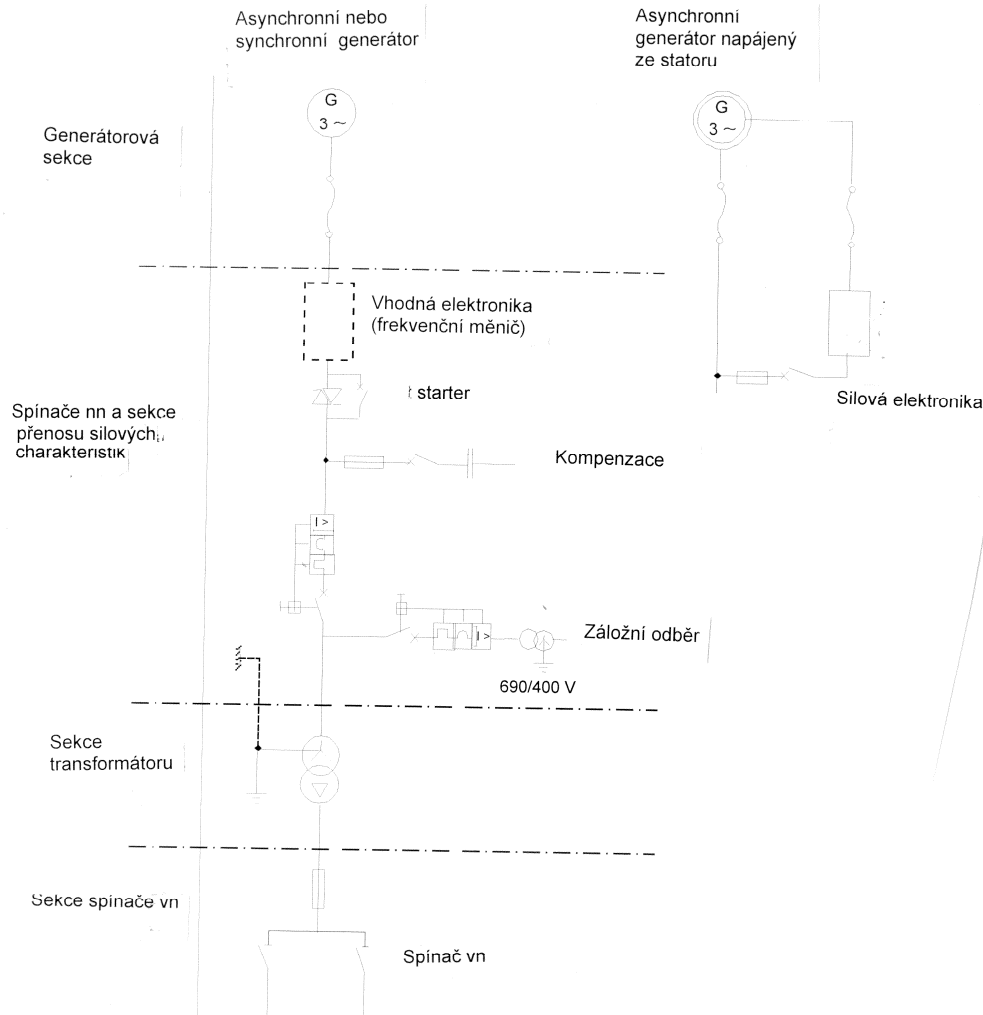
8.2 Uspořádání elektrického zařízení

8.2.1 Elektrická soustava

Bez ohledu na volbu generátoru, způsoby řízení, hladiny napětí a fyzické uspořádání elektrického zařízení, u elektrických soustav větrných turbín existují podobnosti. Mohou se vytipovat 4 různé sekce zařízení. Počínaje generátorem a postupem až na připojovací kabely se jedná o tyto sekce:

- Generátorová sekce
- Spínače nn a sekce přenosu silových charakteristik
- Sekce transformátoru
- Sekce spínače vn

V závislosti na velikosti větrné turbíny mohou být dvě poslední sekce společné pro skupinu větrných turbín. U turbín se jmenovitým výkonem 250 kW a vyšším se obvykle používá jeden transformátor pro každou turbínu. Na obrázku 20 je znázorněna tato situace.



Obrázek 20 – Přehledné schéma elektrického zařízení VE připojené do sítě

Spínač vn ve spínačové sekci zabezpečuje dvě činnosti:

- propojuje kabely mezi větrnými turbínami a provádí odpojení zařízení takovým způsobem, že sekce kabelové sítě, obvykle paprskové se mohou vypnout a uzemnit je-li to nutné z provozních důvodů nebo při opravě
- chrání větrnou turbínu přerušením napájení ze sítě, dojde-li k poruše v silové části nebo u transformátoru větrné turbíny. Toto se zabezpečí pojistkami vn nebo vypínači. Tato sekce se umísťuje vždy v úrovni země buď v samostatné transformovně nebo ve stožáru VE, je-li transformátor umístěn uvnitř větrné turbíny.

Transformátor v transformátorové sekci transformuje nn napětí generátoru na vn napětí, které se používá ve sběrné soustavě větrné farmy. Uzel hvězdy na straně nn transformátoru je propojen s uzemňovací

soustavou instalace a hlavní uzemňovací přípojnicí větrné turbíny. Transformátor je umístěn buď v samostatné transformovně společně s vypínačem vn, u paty stožáru nebo v gondole. Transformátor je obvykle olejový, je-li umístěn v samostatné transformovně a suchý při umístění ve větrné turbíně.

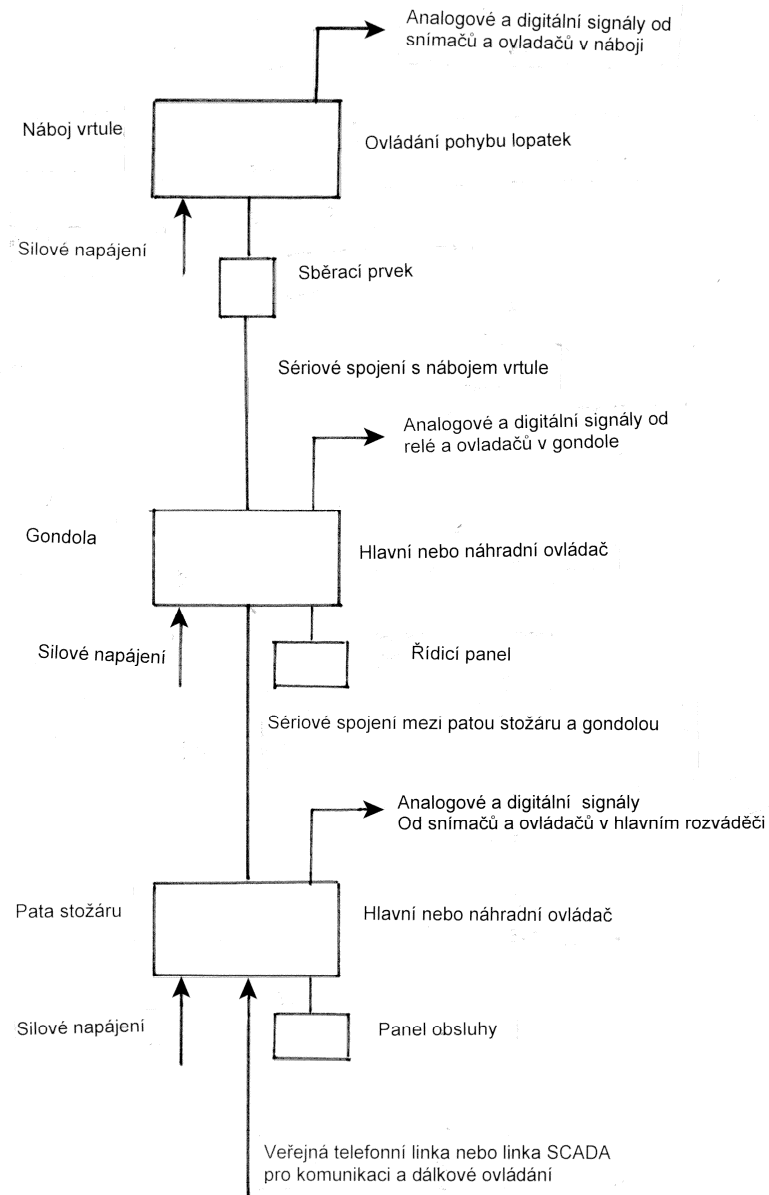
Spínač nn a sekce přenosu výkonových charakteristik plní několik funkcí. Následuje popis typického uspořádání, které není reprezentativní pro všechny větrné turbíny. Zajišťují výstup pro pomocný transformátor snižující generátorové napětí na normální úroveň nn napětí používanou v průmyslových instalacích (400/230 V nebo 190/110 V v závislosti na místních standardech). Z tohoto transformátoru jsou napájeny čerpadla, systémy řízení, vývody a osvětlení. Kompaktní skříňový vypínač se zkratovou a tepelnou ochranou připojuje transformátor na primární silové obvody. Baterie kondenzátorů pro kompenzaci jalového výkonu je zapojena hned za vypínačem buď přes pojistky, nebo přes menší skříňový vypínač. Kondenzátory se spínají stykačem. V závislosti na typu generátoru turbíny (proměnná rychlost nebo stálá) se vloží přímo před generátor silová elektronika – obvykle ve formě frekvenčního měniče (proměnná rychlost) nebo tyristorového spouštěče (stálorychlostní indukční generátor). Tato sekce je umístěna před sekcí transformátoru.

Generátor je umístěn v gondole. V některých případech se proměnné rychlosti dosáhne použitím asynchronního generátoru napájeného ze statoru, kde je navinutý rotor také zapojen v hlavním silovém obvodu. Toto a příslušná silová elektronika rotoru je zobrazeno na pravé straně obrázku 20.

8.2.2 Řídicí systém

Řídicí systém má formu rozsáhlého kabelového systému v gondole, stožáru a rotoru VE (viz obrázek 21). Skříňe systému řízení jsou napájeny z pomocného transformátoru přes automatické pojistky v silovém rozvaděči. Jedná se o převod na příslušnou napěťovou hladinu pro napájení mikroprocesorů, snímačů, transduktorů a podobného zařízení, které tvoří řídicí systém. Hlavní část řídicího systému je umístěna v patě stožáru nebo v gondole. V mnoha případech je decentralizovaný systém umístěn v náboji vrtule a řídí a kontroluje pohyb lopatek.

Mezi různými prvky řídicího systému jsou nutná sdělovací vedení, jsou-li umístěny v patě stožáru, gondole nebo v náboji vrtule. Tato vnitřní vedení jsou často tvořena optickými kabely. Jestliže neobsahují kovové dráty, chrání zařízení na obou koncích od přepětí indukovaných bleskovými proudy.



Obrázek 21 – Přehledné schéma řídicího systému

Systém dálkového ovládání je obvykle tvořen modemy a telefonními kabely nebo systémem radionavigačního signálu. Není-li vedení řádně chráněno omezovači přepětí, může se stát zdrojem a příčinou hlavního podílu poruch řídicího systému způsobených úderem blesku, které nezasáhnou přímo větrnou turbínu. Je třeba uvést, že řídicí systém s podstatně nižšími napětími než jsou u silového systému je mnohem citlivější na poškození bleskem.

8.3 Zóny ochrany před bleskem LPZ

Větrná elektrárna se může zhruba rozdělit do fyzických oblastí, které jsou definovány na základě povahy působení blesku na prvky VE v této zóně. Rozdělení VE do ochranných zón je nástrojem pro zajištění systematické a dostatečné ochrany všech prvků VE. Tyto zóny ochrany jsou definovány v závislosti na tom, zda je možný nebo není přímý úder blesku a na velikosti bleskového proudu a očekávaného doprovozného elektromagnetického pole v dané zóně (viz tabulka 15). Metody ochrany před bleskem se aplikují za účelem ochrany prvků, například strojních systémů nebo systémů řízení, aby odolaly elektromagnetickému poli a bleskovému proudu, které by mohly působit v zóně, ve které jsou prvky umístěny. Například ochrana proti blesku je nezbytná pouze u kabelů vycházející z této zóny do zóny s nižší úrovní ochrany, zatímco vnitřní propojení v této zóně může být nechráněno. Podrobnosti jsou uvedeny v IEC 61312 a jsou dále rozvedeny.

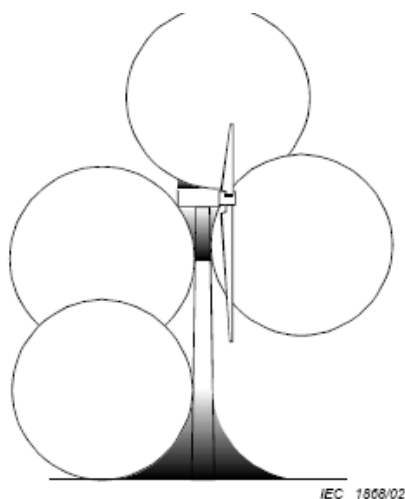
Tabulka 15 – Zóny bleskové ochrany

Zóna LPZ 0 _A	Náklonnost k přímému úderu blesku, plný bleskový proud, neutlumené elektromagnetické pole
Zóna LPZ 0 _B	Přímý úder blesku nehrozí, plný bleskový proud, neutlumené elektromagnetické pole
Zóna LPZ 1	Přímý úder blesku nehrozí, omezený bleskový proud, utlumené elektromagnetické pole
Zóna LPZ 2	Dále omezený bleskový proud, dále utlumené elektromagnetické pole

Poznámka Pro další omezení vlivů lze definovat další zóny bleskové ochrany s vyššími čísly

8.3.1 Zóna LPZ 0

Hranice mezi zónami 0_A a 0_B je stanovena pomocí metody valčích se koulí podle obrázku 22. Světlejší vyznačené oblasti jsou 0_B, kam nemůže přímo uhořit blesk a ostatní jsou 0_A. Oblasti, proti kterým se nemůže koule odvalit jsou chráněny proti působení přímého úderu blesku. Jak je vidět, úder blesku mohou udeřit do většiny povrchu větrné turbíny – takové oblasti jsou proto 0_A. Pomocí jímačů (například hromosvodů) umístěných na zadní straně krytu gondoly se vytvoří na vrcholu gondoly zóna LPZ 0_B a tím mohou být meteorologické přístroje chráněny proti působení přímého úderu blesku. U paty VE je také zóna LPZ 0_B a tou je transformovna, je-li tam umístěna, ta je také chráněna proti přímému úderu blesku.



Obrázek 22 – Metoda valčích se koulí

8.3.2 Ostatní zóny

Hranice mezi zónami LPZ 0_A nebo LPZ 0_B a LPZ 1 může být tvořena stožárem nebo vrcholem krytu gondoly (pokud je kovový nebo obsahuje vhodný kov), aby byly prvky chráněny Faradayovou klecí. Je-li kryt gondoly ze sklolaminátu, doporučuje se, aby kovová kostra nebo rám byl součástí krytu a splnění tohoto minimálního požadavku znamená definici prostoru uvnitř jako zónu 0_B pro ochranu prvků gondoly před přímými úderů blesku (viz obrázek 23). Kryt gondoly má být samozřejmě propojen se základovou deskou. V ideálním případě se má kovová síť krytu ze sklolaminátu stát součástí rámu a lze pak definovat pro gondolu zónu 1. Doporučuje se, aby taková síť měla rozteč ok rovnou polovině vzdálenosti od nejbližšího ohroženého prvku.

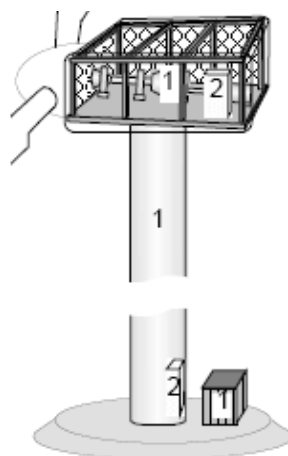
Obrázek 23 také ukazuje, jak se má vnitřní prostor větrné turbíny rozdělit na ochranné zóny 1 a 2. Gondola (s dostatečným množstvím kovu v krytu), stožár a objekt transformovny jsou prostory se zónou 1. Zařízení uvnitř kovových skříní v prostorech se zónou 1 jsou v ochranné zóně 2. Například ovládače uvnitř skříně v kovovém stožáru jsou chráněny jako v zóně 2, ale umístěné v kovové skříně vně stožáru jsou chráněny jako v zóně 1.

Velmi citlivá zařízení se mohou umístit v nejvíce chráněné zóně 3 v dalších úrovních kovových skříní. Je to citlivost prvků v dané zóně, co definuje úroveň působení blesku (jako je proud, napětí a elektromagnetické pole), která musí být v této zóně dosažena. Proto v IEC 61312 nejsou doporučeny žádné hodnoty proudu, napětí a elektromagnetického pole pro jednotlivé zóny.

8.3.3 Hranice zón

Na každé hranici zóny musí být zajištěno, že kabely a vodiče křížující hranici nevedou velké části bleskového proudu nebo přechodná napětí do zóny ochrany s vyšším číslem. Toto se provádí metodami pospojování a stínění a přepětovou ochranou kabelů a vodičů na hranici zóny. Cílem je snížit velikost proudu a napětí na přijatelnou úroveň pro zařízení umístěné v ochranné zóně s vyšším číslem.

Počet nezbytných prvků pro ochranu proti blesku má být snížen pomocí vhodného rozdělení v zónách, vhodným umístěním kabelů, použitím stíněných kabelů a použitím optických kabelů pro přenos signálů a dat. Přepětová ochranná zařízení SPD mohou být relativně drahá a rozměrná a tato skutečnost znamená, že jejich použití by mělo být omezené. Kromě toho tato zařízení mohou selhat z důvodů vlivů, které na ně působí a také z důvodů stárnutí a zhoršování parametrů.



Obrázek 23 – Příklad rozdělení vnitřního prostoru VE do ochranných zón

8.3.4 Požadavky na zónu ochrany

Aby se vyhnulo případným škodám nebo vážným poruchám, musí se v dané zóně zajistit, aby nebyly prvky vystaveny částím bleskového proudu, rozdílným napětím nebo elektromagnetickým polím, které převyšují výdržné hladiny. V tabulce 16 jsou uvedeny příklady pro různé zóny.

Tabulka 16 – Příklady požadavků na prvky v daných zónách

Zóna	Požadavky na ochranu před bleskem
LPZ 0 _A	Prvky v této zóně musí být schopné odolat přímému úderu blesků s proudy odpovídající zvolené hladině ochrany před bleskem, odolat neutlumenému elektromagnetické pole vyvolanému proudem blesku a vést plný bleskový proud
LPZ 0 _B	Stejně jako v LPZ 0 _A kromě toho, že prvky neodolají přímému úderu blesku
LPZ 1	Elektromagnetické pole vyvolané bleskovým proudem je utlumené o 25 dB do 50 dB a proudy a napětí jsou omezeny svodiči blesku například 3 kA (8/20 μs) a 6 kV (1,2/50 μs)
LPZ 2	Elektromagnetické pole je dále utlumené kovovými skříněmi a proudy a napětí jsou dále omezeny pomocí SPD

8.4 Mechanismy přepětové vazby

Bleskové proudy mohou indukovat přechodové proudy různými vazebními mechanismy. Tyto mohou snadno způsobit napětí dost vysoká, aby poškodila silové napáječe, desky PC, snímače a další elektrická a elektronická zařízení. V dalším textu jsou uvedeny nejběžnější vazební mechanismy.

8.4.1 Vodivá vazba

Bleskový proud nalezne svoji dráhu k zemi všemi vodiči a rozdělí se v poměru jejich impedancí. Pro vodivou vazbu v obvodu musí existovat vstup a výstup proudu. Z důvodů přítomnosti velmi vysokých potenciálů může vzniknout obloukový výboj izolací nebo malými vzduchovými jiskřišti. Vodivé vedení se může minimalizovat za předpokladu zajištění nízkoimpedanční cesty pro bleskový proud. Správně zvolená izolační hladina a dobré pospojování mohou zamezit přeskokům.

8.4.2 Kapacitní vazba

Kapacitní vazbou se snadno přenáší vysokokmitočtové signály se strmým nárůstem napětí, jako je blesk.

Nárůst napětí je spojen s elektrickým polem a vodiče v tomto poli může vzniknout potenciál úměrný rychlosti změny elektrického pole a nepřímo úměrné ke své vzdálenosti od zdroje.

Kapacitní vazba mezi jedním prvkem a dalšími může být potlačena.

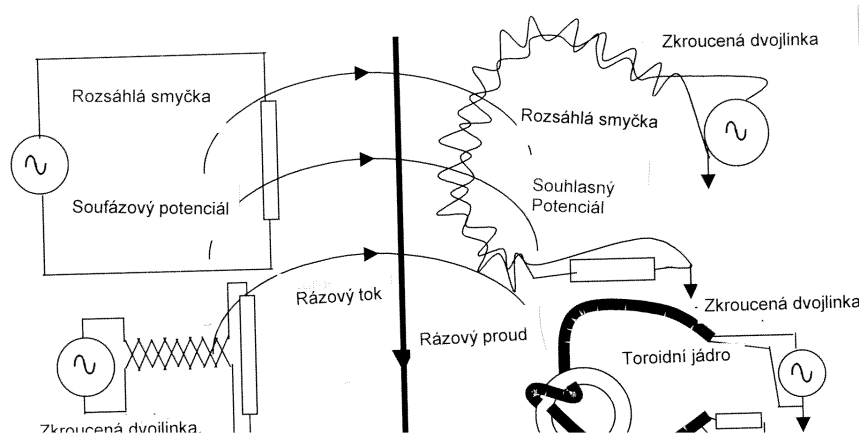
- Stíněním (kompletní kovový kryt, opletené pláště vodičů nebo kryty ze síta)
- Zvětšením vzdálenosti mezi ovlivňujícími se prvky (například posunutí drátů blíže k zemi, využití uzemněných kovových potrubí, kabelových kanálů) a
- Zmenšením plochy exponovaného povrchu .

8.4.3 Magnetická vazba

Strmý nárůst napětí spojený s úderem blesku vyvolají magnetická pole s velkou rychlostí změny. Toto může být zdrojem škodlivých napětí indukovaných ve smyčkách vodičů situovaných v těchto polích. Přestože se tomu dá zamezit, je to hlavní důvod poškození elektrického soustavy větrné turbíny.

Jak je uvedeno na obrázku 24, impulzní proud protékající vodičem (vedení tučně vyznačené) vytváří indukční siločáry obepínající všechny uvedené obvody. V prvním obvodu (viz obrázek 24a) je prostor smyčky velmi rozsáhlý a uzavřené siločáry jsou významné dost na to, aby vytvořil ničivý rozdílový potenciál. Používáním kabelu se stočeným párem se plocha exponované smyčky může minimalizovat, a tím se bezpečně omezí nebo úplně eliminuje indukované přepětí.

U druhého obvodu (viz obrázek 24b), ačkoliv je vodič zkroucený, je plocha smyčky velká a oba



24 a

24b

Obrázek 24 – Rozdílová a souhlasná vazba

konce jsou uzemněny. . Následkem toho se může do obvodu indukovat souhlasný proudový ráz . Toto se může vyřešit odstraněním propojení se zemí na jedné straně. Musí se to provést opatrně, protože indukované napětí může převýšit přeskokové napětí. Může-li indukované napětí převýšit přeskokové napětí, musí se pro ochranu použít svodič napětí. Šum souhlasného módu se může utlumit vinutím několika závitů zkrouceného vodiče na toroidní jádro (viz obrázek 24b).

Návrhy na snížení magnetické vazby:

- Vysokomitočtová magnetická pole se mohou významně omezit kovovým zakrytím (kabelové kanály, trubky, kryty, kovové skříně). Magnetické rušení se odchýlí a rozptýlí vlivem vířivých proudů v kovovém krytu
- Zamezení vytvoření velkých smyček, které jsou citlivé na vazbu magnetickým tokem je nutné vést vodiče těsně podél kovových částí jako jsou převodovky a generátory
- Kroucené kabely mohou snížit magnetickou vazbu, protože plocha mezi vodiči je velmi malá a signál indukovaný v dvou vodičích by se měl vyrušit na rozdílových vstupech.

8.5 Pospojování a stínění

Pospojování uvnitř větrné turbíny se vyžaduje pro ustavení ekvipotenciálního spojení mezi částmi větrné turbíny. Tato ekvipotenciální spojení zajišťují ochranu proti dotykovým a krokovým napětím během úderu blesku. Propojení zařízení je důležité při definici pravděpodobnosti poškození elektrických a elektronických systémů.

Stínění je prostředek, který oslabí úroveň elektromagnetického pole. Omezení elektromagnetických polí může v obvodech značně snížit hladiny indukovaných napětí.

V současné době ukazují zkušenosti z mnoha poškození řídicích systémů větrných turbín, že bylo možné jim předejít účinným pospojováním a stíněním. Některé pokyny pro pospojování a stínění vyžadované u větrných turbín jsou dále komentovány. Velmi se doporučuje prostudovat IEC 61024-1 a IEC 61312, které rozvádí návody pro pospojování a stínění staveb.

8.5.1 Pospojování

Vzhledem k transienční povaze bleskového proudu, může být úbytek napětí podél vodiče přibližně

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (20)$$

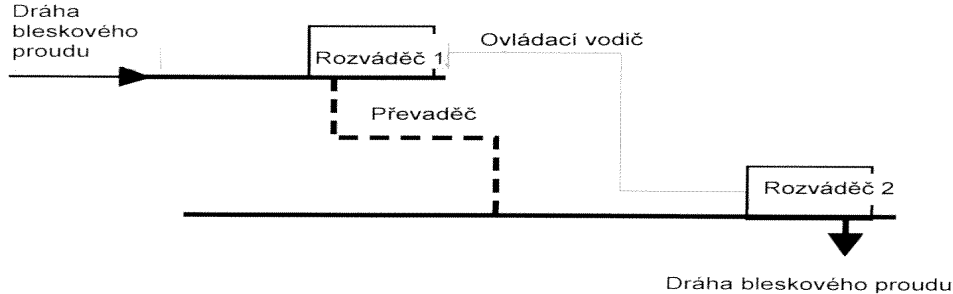
kde

L je indukčnost vodiče

di/dt je maximální rychlost změny bleskového proudu

Indukčnost vodiče může být obvykle ve výši 1 $\mu\text{H}/\text{m}$ a maximální rychlost změny bleskového proudu může kolísat od 0,2 do 200 $\text{kA}/\mu\text{s}$ v závislosti na úderu blesku a úrovni proudu rozděleného mezi vodiči. Úbytek napětí podél pásku na pospojení může tedy dosáhnout až 200 kV/m .

Uvažujme systém na obrázku 25 se dvěma řídicími skříněmi umístěnými na různých kovových deskách uvnitř gondoly větrné turbíny. Bleskový proud prochází do horní desky a je pomocí pospojení z pásku přenesen do spodní desky. Prochází-li bleskový proud páskem pospojení, zvýší se potenciál skříně 1 vzhledem ke skříně 2. Možným důsledkem změny potenciálu je poškození součástí a prvků umístěných ve skříně 1 nebo 2. Následky mohou být zmírněny dobře provedeným pospojením.



Obrázek 25 – Dvě řídicí skříně umístěné na různých kovových deskách uvnitř gondoly

Použití vícenásobných pásků na pospojení a omezení jejich délky na minimum lze dosáhnout nejmenší možný rozdíl napětí mezi dvěma ocelovými deskami.

Pro pospojení ve větrné turbíně se používá proto vícenásobných vodičů, které jsou:

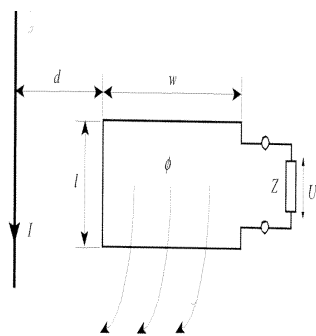
- Schopné vést předpokládanou část bleskového proudu danou cestou
- Krátké a rovné jak je to jen možné

Vedení se může také chránit kruhovými dráty v kabelových kanálech/trubkách nebo použitím stíněného kabelu podle 8.5.2.

8.5.2 Stínění

Protéká-li bleskový proud větrnou turbínou, vytváří silná magnetická pole. Prostupuje-li tato silná mění se smyčkou, indukují napětí v této smyčce. Velikost napětí je úměrná rychlosti změny magnetického pole a ploše příslušné smyčky. Projektant musí brát v úvahu velikost indukovaných napětí a přesvědčit se, že tato napětí nepřekročí hladinu výdržného napětí kabeláže a připojeného zařízení.

Obrázek 26 ukazuje smyčku drátu běžící poblíž vodiče, kterým protéká bleskový proud. Úbytek napětí na impedanci Z bude úměrný rychlosti změny magnetického pole



Obrázek 26 – Mechanismus magnetické vazby

Úbytek napětí se může vyjádřit rovnicí

$$U = \frac{d\phi}{dt} \quad (21)$$

kde

ϕ je spřažený magnetické ve Wb

U je indukované napětí ve smyčce ve V

Může se vypočítat celkový magnetické tok procházející smyčkou:

$$\phi = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{d+w}{d} \right) \right] \quad (22)$$

Tedy indukované napětí ve smyčce je:

$$U = \frac{\mu_0}{2\pi} \times l \times \ln \left(\frac{d+w}{d} \right) \times \frac{di}{dt} = M \times \frac{di}{dt} \quad (23)$$

kde

μ_0 je permitivita vzduchu a ostatní rozměry jsou uvedeny na obrázku 26

M je vzájemná indukčnost mezi smyčkou a vodiček vedoucím proud

Toto napětí má být příkladem rozdílového napětí, to je indukované mezi dvěma vodiči systému. Aby se zamezilo indukci napětí v elektrickém vedení, je zřejmé, že redukce vrcholové změny magnetického pole procházejícím smyčkou a redukce plochy smyčky přinese výsledek v nižších indukovaných napětích. Toho má být dosaženo několika cestami:

a) **zvětšením vzdálenosti mezi vodičem s bleskovým proudem a elektrickým obvodem:** tato metoda snížení indukovaných napětí je obecně účinná, ale není možná v prostorových omezeních větrné turbíny. Ale je-li možné vytvořit ve větrné turbíně dominantní cestu bleskového proudu, pak je možné uvažovat o vhodném přeložení vedení větrné turbíny.

b) **použití krouceného párového kabelu:** použití krouceného párového kabelu redukuje hladinu indukovaného napětí. Toto bude vzhledem k účinné redukci plochy, kterou prochází magnetické pole, téměř na nulu. Systémy krouceného párového kabelu zredukuje proto rozdílová napětí, ale souhlasná napětí mohou stále existovat.

c) **použití stínění:** technologie kladení vedení do ocelových trubek nebo kovových instalačních trubek je dobrá, protože velmi účinně stíní kabely od magnetických polí. Použití stíněných kabelů také zajistí stejný efekt u vodičů umístěných uvnitř stínění. Je důležité přesto poznamenat, že ochrana je možná pouze za předpokladu dobrého spojení obou konců stínění/trubek/plášťů se zemí. Je-li spojení se zemí pouze jeden konec stínění vodiče, pak není vodič chráněn před induktivní/magnetickou vazbou.

Níže uvedená tabulka uvádí účinnost krytých/stíněných vodičů při redukci přechodných napětí. Ukazuje se také efekt umístění vodiče v kovové elektroinstalační trubce/kabelovém kanálu, které jsou důkladně propojeny na obou koncích se zemí. Tento příklad ilustruje velikost očekávaných napětí, je-li kabel nebo vodič, kterým protéká 100 kA s rychlostí nárůstu po 200 kA/μs a je veden přibližně 30 mm od převodovky nebo generátoru. Jedná se o velký proud a vysokou rychlost změny bleskového proudu, ale zřetelně se projevuje účinnost ochrany stíněním.

	Nestíněný vodič V/m	Stíněný proud (je-li vodič stíněn) A	Vodiči chráněné stíněním V/m
Vnější vodič mimo kanál	600 – 900	2 600	78
Vodič v kanálu	40 – 160	480	14

Použitím zkroucených párů, stíněných vodičů, vodičů v kovových elektroizolačních trubkách a vodiči v kovových kanálech dojde k redukci magnetického pole v tomto vodiči. Stínění/kovové trubky/kovové kanály se musí propojit na obou koncích s konstrukcí. Vedením vodiče v blízkosti kovových konstrukcí a zamezení smyček z vodiče se redukuje plocha magnetické vazby. Tyto metody účinně redukují plochy smyček a stínit vnitřní vodiči před změnami magnetických polí.

8.6 Ochrana přepětovým ochranným zařízením

Jak bylo uvedeno, bleskosvody jsou v konstrukci proto, aby svedly nebezpečné bleskové proudy přímo do uzemňovací soustavy, aby se zamezilo poškození přímým působením blesku. Tedy stínění se používá na ochranu citlivých obvodů proti nepřímému vlivu blesku (vazby) způsobených průchodem bleskových proudů. Je-li vyžadována doplňující ochrana, může být provedena svodiči přepětí, zejména na hranicích zón.

8.6.1 Všeobecná ochrana přepětovým ochranným zařízením

Přepětová ochranná zařízení nebo svodiče přepětí omezují napětí a svádějí rázové proudy změnou své impedance nad určitým napětím. Obvykle se zařízení vrací do normálního stavu po průchodu přechodných jevů. Napětí při kterém se mění jejich impedance má být dostatečně vysoké, aby umožnilo bezpečný, normální provoz chráněného zařízení, ale dostatečně nízké, aby se zamezilo překročení isolační pevnosti nebo poruše zařízení.

8.6.2 Ochrana elektrických prvků přepětovým ochranným zařízením

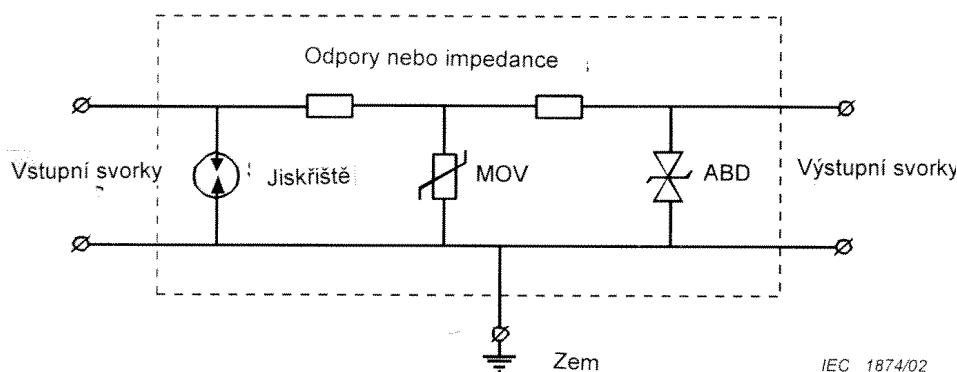
Elektrická silová zařízení, jako jsou motory, generátory, transformátory a spínací zařízení jsou navržena na výdržná napětí. Izolace elektrického silového zařízení obvykle odolá výdržným přechodným napětím o řádu kV. Proto se doporučuje, aby svodiče přepětí nebo přepětová ochranná zařízení byly dimenzovány na provozní napětí a možná přechodná dočasná přepětí. Jinak by svodiče přepětí nebo přepětová ochranná zařízení mohly vést proud při normálních stavech sítě a měly tím velmi zkrácenou životnost. Podrobnější informace týkající se umístování přepětových ochranných zařízení a bleskojistek je možné nalézt v IEC 61643-22, IEC 60099-5 a IEC 61643-12.

8.6.3 Ochrana signálních obvodů přepětovým ochranným zařízením

Oproti elektrickému silovému zařízení musí signální obvody vydržet pouze přechodným výdržným napětím v řádu desítek voltů.

V ideálním případě mají být signály používané v citlivých obvodech přenášeny optickými kabely, které neobsahují kovové vodiče. Ale mnoho výrobců větrných turbín používá kovové vodiče pro přenos signálů na dlouhé vzdálenosti, jako jsou z vrcholu stožáru do základního regulátoru nebo dále do centra pro řízení a dálkové ovládání mezi větrnými turbínami ve větrné farmě. Tyto obvody jsou náchylné na přenesená přechodná přepětí zejména v exponovaných místech větrné turbíny. V závislosti na zaměření chráněného obvodu nebo zařízení se mají zvolit sady přepětových ochranných zařízení a umístit na hranicích zón.

Na obrázku 27 je uveden příklad kombinace přepětových ochranných zařízení umístěných v bloku s bleskojistkami. Podle požadavku projektanta se mohou prvky získat soustředěné v sestavě nebo samostatně. Jiskřiště mohou rozptýlit značné množství energie vzhledem k jejich velikosti, ale stále nemohou zabránit poškození přenosů v řádu několika stovek voltů.



Obrázek 27 – Příklad návrhu kombinovaného typu přepět'ového ochranného zařízení

Omezovač z kysličníků kovů může vyhovovat pouze pro ochranu citlivé elektroniky, ačkoliv zapůsobí velmi rychle. Velice rychlá vyrovnávací ochrana je tvořena speciálními Zenerovými diodami nazývanými diody s lavinovým průřezem, ale mají malou schopnost ztráty energie. Požadují se některé impedance pro koordinaci funkce těchto zařízení a zajistí, že není překročena schopnost ztráty energie každého zařízení (viz IEC 61312-3). V mnoha případech správné rozmístění odporu a reaktance vedení umožňuje zabezpečit tuto impedanci. Ale mnoho kompaktních systémů vícehladinové ochrany vkládá impedanci kvůli krátkému vedení mezi ochrannými prvky. Je-li vložena tlumivka, má se zvolit taková, aby se nepřesycovala. Doporučuje se, aby projektant prostudoval IEC 61312.

Přepět'ový ochranný systém se používá proto, aby udržel přechodový jev pod maximálním napětím chráněného zařízení. Přepět'ový ochranný systém se má navrhout tak, aby nebyl ovlivněn vstupní signál.

Novější větrné turbíny využívají pro přenos signálů optická vlákna, aby se omezil šum a další rušení v obvodu. Optická vlákna jsou velmi vhodná na ochranu signálových polí proti poškození bleskem, jsou-li vhodně používána. Zejména se mají používat optické kabely bez kovových vodičů.

8.6.4 Místo instalace přepět'ového ochranného zařízení

Je třeba zdůraznit, že všechna přepět'ová ochranná zařízení musí být plně integrována do plánu ochrany zón před bleskem větrné turbíny. Přepět'ová ochranná zařízení nebo bleskojistky se musí umístit na hranicích zón a připojit k uzemnění vedením o co nejkratší délce.

8.7 Shrnutí

Pro zajištění optimální ochrany je nutné:

- Definovat zóny ochran.
- Vytipovat zařízení a vodiče citlivé na přepět'ovou vazbu a poškození.
- Zabezpečit takové stínění a pospojování, aby se omezila daná vazba
- Nakonec doplnit ochranné zařízení na hranicích zón, aby se omezily zbývající části přepětí a byly svedeny do země dříve, než dojde k poškození citlivých zařízení

9 Uzemňování

Pro rozptýlení bleskových proudů ve větrné turbíně do země je nezbytné vybudovat vhodnou uzemňovací soustavu, aby se omezila přepětí, která mohou dosáhnout nebezpečných hodnot pro obsluhu a zařízení. Tento cíl je splnitelný při dosažení malé impedance uzemňovací soustavy.

U každé VE se musí vybudovat vlastní uzemňovací soustava, dokonce i kdyby byla propojena s rozsáhlou uzemňovací soustavou farmy VE.

9.1 Ochrana před bleskem v rámci uzemňovací soustavy samostatně stojící VE

Uzemňovací soustava chránící před bleskem se má navrhout podle IEC 61024-1. Základní doporučení IEC 61024-1 je se mohou použít dva typy zemničů (uspořádání typu A a typu B).

9.1.1 Uspořádání typu A

Toto uspořádání se skládá z vodorovného nebo svislého zemniče, který je spojen s každým svodem. V případě uzemňovací soustavy pro VE je svislým vodičem stožár VE.

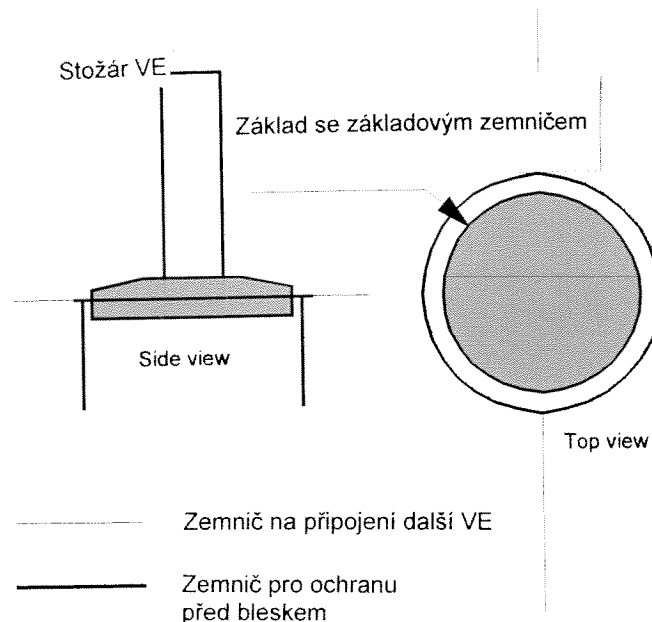
9.1.2 Uspořádání typu B

Toto uspořádání se sestává z obvodového zemniče vně objektu, který je uložen minimálně 80 % své celkové délky v zemině. Mohou se použít doplňující svislé a vodorovné zemniče v kombinaci s kruhovým zemničem. Zemnič má být uložen v zemi v hloubce minimálně 0,5 m. Další podrobnosti o uspořádání zemničů lze nalézt v IEC 61024-1-2.

Pro VE se obvykle používá typ B s kruhovým zemničem uloženým v betonovém základu (viz obrázek 28). Vodorovné zemniče se používají pro propojení uzemňovací soustavy VE s další VE, tvoří-li větrnou farmu.

V IEC 61024-1 se definuje poloměr kruhového zemniče podle hladiny ochrany před bleskem požadované pro konstrukci a rezistivitu půdy v místě VE. Kruhový zemnič se obvykle položí po obvodu základu VE. Poloměr kruhového zemniče je obvykle určen poloměrem základu a dodatečné zemniče by měly být spojeny s okružním zemničem uzemňovacími přívody u svodů a, pokud je to možno, se stejnou vzájemnou vzdáleností.

V IEC normě je uvedeno opatření, když poloměr základu VE je menší než minimální poloměr v IEC 61024-1 pro detailní hladinu ochrany před bleskem. V toto případě se musí zabudovat doplňující zemniče svislé nebo vodorovné. V rovnicích 24 a 25 jsou uvedeny vztahy pro délku doplňkových zemničů. Pro VE mají být nejméně dva doplňkové zemniče.



Obrázek 28 – Typické uspořádání uzemňovací soustavy VE

$$l_r = l_1 - r \quad (24)$$

$$l_v = \frac{l_1 - r}{2} \quad (25)$$

kde

l_r je požadovaná délka vodorovného zemniče

l_v je požadovaná délka svislého zemniče

r je poloměr kruhového zemniče

l_1 je požadovaná délka zemniče podle IEC 61 024-1

Tyto délky nemusí být uvažovány v případě, že se dosáhne zemní odpor 10Ω . Použití vodorovných nebo svislých zemničů závisí na rozmístění větrné farmy a struktuře půdy (viz tabulka 18). Je-li uzemňovací soustava VE propojena s jinou uzemňovací soustavou (například blízka budova), jsou uvedeny požadavky na propojovací vodič a vliv soustavy v čl. 9.2.

Tabulka 18 – Použitelnost typů zemničů

Typ zemniče	Vhodné pro
Vodorovný	Použití tam, kde rezistivita půdy neklesá s hloubkou nebo kde kabelové kanály umožňují instalovat snadno horizontální zemniče
Svislý	Použití tam, kde rezistivita půdy se snižuje s hloubkou nebo kde uzemňovací soustava musí zůstat kompaktní

Během úderu blesku není zvlášť důležitý ohmický odpor ale induktivní odpor uzemňovací soustavy. Obsahuje-li bleskový proud mnoho vysokokmitočtových složek, tyto reagují s induktivním odporem uzemňovací soustavy a vyvolají velmi vysoké přechodové impedance. Uzemňovací soustava o velmi nízkém zemním odporu, která je instalována pomocí horizontálních zemničů o větší délce než 50 m ale může mít velmi vysokou přechodnou impedanci. Například, je-li požadován doplňkový vodorovný zemnič o délce 60 m, pak by bylo lepším řešením použít násobné zemniče o kratších délkách místo jednoho dlouhého zemniče.

Vodiče používané pro uzemňovací soustavu ochrany před bleskem mají mít minimální rozměry podle IEC 61024-1 (viz tabulka 19)

Tabulka19 – Materiál, tvary a minimální rozměry zemničů

Materiál	Tvary	Minimální rozměry			Poznámka
		Zemničí tyč Ø mm	Zemničí vodič	Zemničí deska mm	
Měď	Lano ³⁾ Tuhý drát ³⁾ Tuhý pásek ³⁾ Tuhý drát Trubka Tuhá deska Mřížovaná deska	15 ⁸⁾ 20	50 mm ² 50 mm ² 50 mm ²	500 x 500 600 x 600	1,7 mm min. průměr každého lana 8 mm průměr 2 mm min. tloušťka 2 mm min. tloušťka stěny 2 mm min. tloušťka 25 mm x 2 mm rozměr Minimální délka tvaru mříže: 4,8 m
Ocel	Pozinkovaný tuhý drát ^{1) 2)} Pozinkovaná trubka ^{1) 2)} Pozinkovaný tuhý pásek ¹⁾ Pozinkovaná tuhá deska ¹⁾ Pozinkovaná mříž. deska ¹⁾ Tuhý drát s měď. obalem ⁴⁾ Čistý tuhý drát ⁵⁾ Čistý nebo pozinkovaný tuhý pásek ^{5) 6)} Pozinkované lano ^{5) 6)} Pozinkovaný křížový profil ¹⁾	16 ⁹⁾ 25 14 50 x 50 x 3	10 mm průměr 90 mm ² 10 mm průměr 75 mm ² 70 mm ²	500 x 500 600 x 600	2 mm min. tloušťka stěny 3 mm min. tloušťka 3 mm min. tloušťka 30 mm x 3 mm průřez 250 µm minimální poloměr Obsah mědi v obalu 99,9 % 3 mm min. tloušťka 1,7 mm min. průměr každého lana
Nerezová ocel ⁷⁾	Tuhý drát Tuhý pásek	15	10 mm průměr 100 mm ²		2 mm min. silný
<p>Vrstva by měla být hladká, souvislá a bez natavenin (tavících kazů), minimální tloušťka vrstvy 50 µm pro kulatý materiál a 70 µm pro plochý materiál. Závity musí být před pozinkováním odřezány. Smí být pocínovány. Měď má být nerozebiratelně spojena s oceli. Dovoleno jen při úplném uložení v betonu. Dovoleno jen, je-li v části základového zemniče, který má kontakt se zemí, bezpečné (správné) připojení nejméně každých 5 m k náhodnému ocelovému armování. Chrom ≥ 16 %, nikl ≥ 5 %, molybden ≥ 2 %, karbon ≤ 0,08 %. V některých zemích je dovoleno. V některých zemích jsou zemničí zaváděcí tyče připojeny ke svodům v místě, kde vstupují do země.</p>					

Zejména je důležité, aby zemniče nekorodovaly během životnosti VE.

Pro uzemňovací soustavu se může použít základové ocelové armování. Například větrná elektrárna vystavěná na betonové základové desce o průměru 15 m se může považovat za ekvivalentní kruhovému zemniči o průměru 15 m. Minimální rozměry armování základů musí splňovat tabulku 19 a musí být dobře vzájemně propojeny (svařeny). Požadavky na uzemňovací soustavu musí směřovat k použití kruhových zemničů ve formě ocelového armování.

9.2 Ochrana před bleskem v rámci uzemňovací soustavy větrné farmy

Ochrana před bleskem v rámci uzemňovací soustavy pro každou samostatnou VE větrné farmy je obdobná jako v 9.1 pro samostatně stojící VE. Je výhodné, aby vodorovné zemniče spojující VE vedly ve stejném trase jako silové kabely a/nebo signální a ovládací kabely. Chrání tím silové nebo signální a ovládací kabely před doprovodnými významnými úrovněmi bleskového proudu a snižují hladiny indukovaného napětí u vzdálených VE.

Navrhuje se, aby délka propojených zemničů do 50 m byla klasifikována jako část systému uzemňovací soustavy ochrany před bleskem pro samostatně stojící VE.

Vysoký induktivní odpor vodorovných zemničů o délce nad 50 m znamená, že podstatně nesníží hodnotu vrcholové přepětí blesku, i kdyby byl podstatně nižší DC odpor celé uzemňovací soustavy. Je-li to vyžadováno, má být změněn odpor uzemňovací soustavy u každé VE před připojením na jiný typ kabelu.

Každá ochrana před bleskem v rámci uzemňovací soustavy musí být vždy spojena se zemí sítě ekvipotenciálním pospojením.

10 Bezpečnost osob

10.1 Všeobecně

Větrná turbína je v principu bezpečná pro obsluhu. Ale v průběhu bouřek může být obsluha vystavena dodatečným rizikům. Protože všechny blesky představují u nechráněné větrné turbíny potenciální ohrožení obsluhy, má se u větrné turbíny navrhnout ochrana před bleskem. V průběhu bouřky se nesmí na větrné turbíně pracovat. Do bezpečnostních předpisů se musí zapracovat ustanovení týkající se bezpečnosti obsluhy během bouřky.

Dále jsou popsána možná rizika týkající se bezpečnosti osob.

10.1.1 Gondola

Udeří-li blesk do lopatky, bude bleskový proud procházet gondolou a stožárem. Část proudu může vstoupit do gondoly přes nízkou impedanci hnacího ústrojí. U VE o výšce větší než 60 m je nutné uvažovat také s rizikem úderu blesku do gondoly. Ochrana osob uvnitř gondoly se zabezpečí následně:

- Předpokládají-li se úderu blesků do vrcholu větrné turbíny, může být jímací soustava na vrcholu gondoly pro ochranu osob v gondole neúčinná. Doporučuje se proto, aby se použila jímací soustava, která obsáhne vnitřek gondoly jako Faradayova klec
- u větrné turbíny s izolovaným pohonem se mají provést opatření k instalaci účinného spojení pohonu se zemí, má-li být zajištěn vstup do gondoly
- osoba mimo ochranu zónu jímací soustavy je ohrožena přímým bleskem, protože se nachází v LPZ 0_A. Velmi se doporučuje zabezpečit kryt pro osoby, aby se nacházely minimálně v LPZ 0_B
- Osoby uvnitř gondoly mohou být vystaveny riziku v případě dotyku nebo pobytu v blízkosti kovových částí

10.1.2 Stožár

Do velké části vlastního stožáru a konstrukcí vně stožáru může přímo udeřit blesk, a tím se mohou stát dráhou bleskového proudu do země. Během bouřky má být zajištěna ochrana osob na stožáru nebo uvnitř stožáru takto:

- Osoby uvnitř uzavřeného stožáru (ocelový nebo železobetonový) jsou chráněny proti přímému úderu blesku. Nejbezpečnější místo během bouřky je na jedné plošině stožáru nebo pod úrovní terénu. Použití žebříků, dokonce točitých schodů se má omezit na minimum.
- Osoby vně stožáru mohou být ohroženy přímým úderem blesku. V tomto případě nemůže být provedena důkladná ochrana a pobyt osob vně stožáru za bouřky není dovolen.
- Osoby, které uvnitř příhradového stožáru šplhají, mohou být ohroženy částmi bleskového proudu, výslednými rozdíly napětí a rázovou vlnou vyplývající z blízkého úderu blesku.
- Osoby na nebo uvnitř nevodivého stožáru jsou ohroženy nejvíce.

10.1.3 Oblast v úrovni země

Oblasti v úrovni země větrné elektrárny jsou:

- Uvnitř nebo vně stožáru VE
- Uvnitř nebo vně budovy související s VE.

Bleskový proud tekoucí do konstrukce větrné turbíny bude rozptýlen stožárem do základu. V závislosti na tvaru a rozměrech jímací soustavy způsobí proud napěťový spád v úrovni země okolo stožáru VE. Ochrana osob v během bouřky má být zajištěna:

- osoby v blízkosti otevřených elektrických rozváděčů jsou vystaveny v průběhu úderu blesku působením rozsáhlých poruch uvnitř rozváděčů. Pobyt osob před rozváděči za bouřky není dovolen.
- osoby vně, ale v blízkosti stožáru jsou chráněny proti přímému úderu blesku, ale jsou během přímého úderu blesku ohroženy napěťovým spádem na povrchu země. Pobyt v prostoru s vysokým spádem napětí může způsobit průchod nebezpečného proudu tělem osoby

- osoby uvnitř chráněných budov nejsou ohroženy
- osoby uvnitř zcela zakrytých kovových vozidel nejsou ohroženy.

Způsobí-li blesk poruchu rozvodné soustavy, nevznikne velké nebezpečí pro osoby. Souvisí to se správně navrženými ochranami rozvodné soustavy.

10.1.4 Pokyny pro personál

Bezpečnostní předpisy a výstražná upozornění pro místo obsluhy během bouřky se musí dodržovat. Musí být zřejmé, že v průběhu bouřky mají se osoby nalézat pouze v prostorách chráněných proti působením blesku. Provozní předpisy mají obsahovat bezpečnostní problematiku a opatření uvedená v normě pro školení personálu.

Je třeba poznamenat, že úroveň nebezpečí je vyšší zejména během stavby, kdy ještě není kompletní systém ochrany před bleskem funkční a pro tento případ se musí vypracovat speciální pokyny.

11 Závěry a doporučení

Ochrana před bleskem je všeobecně uvedena v IEC normách:

- IEC 61024 Ochrana staveb před bleskem (nahrazena IEC 62305)
- IEC 61312 Ochrana před elektromagnetickým impulsem blesku
- IEC 61662 Stanovení rizika poškození způsobené bleskem

IEC 61024 obsahuje základní ustanovení pro ochranu a dimenzování systémů ochrany před bleskem pro stavby uvádí metody pro ocenění nebezpečí rizika škod.

IEC 61312 uvádí ochranu před elektromagnetickým impulsem blesku a úvod do problematiky zón ochrany pro budovy a elektrické instalace.

IEC 61662 uvádí metody pro ocenění rizika poškození z hlediska bezpečnosti a ceny.

Ochranné hladiny I a II nepředpokládají v 95 – 98 % případů škodu na zařízení Uvedené principy se mohou také aplikovat pro elektrické soustavy větrné elektrárny. Zdá se, že ochranné hladiny I a II jsou přijatelným výběrem v závislosti na intenzitě bouřkové aktivity v oblasti umístění VE.

Přesto ale zůstávají dva hlavní problémy:

1. Ochrana lopatek před úderem blesku.
2. Prevence poškození ložisek hlavní hřídele (válečky a otočné kroužky), zubů v převodovce a ostatních ložisek, kterými prochází bleskové proudy.

Příloha A

Dotazník týkající se poškození VE bleskem

1. Výrobce větrné turbíny :
2. Typ větrné turbíny (všeobecný popis):
3. Specifické údaje o větrné turbíně:

Výkon(kW)	Výška osy vrtule(m)	Průměr rotoru(m)
Datum instalace.....	Další poznámky.....	
4. Umístění větrné turbíny

Přesná poloha (například souřadnice GPS):

Samostatně stojící VE: VE ve farmě sVE (počet)

V pahorkatině, v rovině, na vrcholu kopce (hory).....

Nadmořská výška VEm nad úrovní moře

Další poznámky.....
5. Klimatické poměry

Bouřka

vítr (m/s)

Teplota°C

Srážky

Další poznámky.....
6. Časové údaje o úderu blesku

Datum: Čas: Předpokládaná přesnost časových údajů :

Další poznámky.....
7. Předpokládané místo úderu blesku

Lopatky	Gondola	Meteorologické zařízení	Stožár
Bleskový svod gondoly	Další		
Další poznámky.....			
8. Poškozené součásti

Náboj	Rotor	Ložisko hlavního hřídele	Ložisko nastavení vrcholu
Ložisko natáčení lopatek	Ložisko generátoru		Ložisko převodovky
Převodovky	Generátor	System řízení	System přenosu signálů
Rozvodná síť	Další prvky		
9. Následky poškození bleskem

Doba výpadku výroby:(hod) Náhrady na výměnu: Kč Cena nedodané energie:Kč

Další poznámky.....
10. Podrobnosti systému ochrany před bleskem

Žádné	Kruhový zemnič	Základový zemnič
Jímací soustava (Typ/umístění):.....		
Svody (Typ/umístění):.....		

Přepětová ochrana/svodič přepětí

Žádná	Ochrana přívodu	Generátoru
Údaje externích vedení	Vnitřní ovládací vedení	Telefonní vedení
Další poznámky.....		

10. Lopatky a ochrana lopatek před bleskem

Výrobce lopatek:Druh lopatek (nastavovací/blokovací):

Jednolopátkové	Dvoulopátkové	Trojlopatkové	Jiné
----------------	---------------	---------------	------

Brzdy ve vrcholu

Pohyb rotoru při úderu blesku

V klidu	V pohybu	Neví
---------	----------	------

Materiál lopatek rotoru

Uhlíkový laminát	Sklolaminát	Sklolaminát/ Uhlíkový laminát	Dřevolaminát
------------------	-------------	-------------------------------	--------------

Plné dřevo	Jiný:
------------	-------------

Typ ochrany před bleskem

Repektor na vrcholu (materiál): Vrcholová čapka (materiál):

Žádná ochrana před bleskem	Jiná:
----------------------------	-------------

Svod lopatky

Vnější	Vnitřní
Průřez:mm ²	Materiál:

Další poznámky.....

Zpozorované poškození

Lopatky bez poškození

Otvory v lopatce: průměr.....mm

Prasklina na líci lopatky (délka):mm

Prasklina na hraně lopatky (délka):mm

Jiné poškození:

Další poznámky.....

Vyznačení poškození na náčrtu lopatky

Návětrná strana

Závětrná strana

Příloha B

Příklad výpočtu četnosti poruch při úderu blesku do větrné elektrárny

Výpočet četnosti úderů blesku do větrné elektrárny

Návrh systému ochrany větrné elektrárny před bleskem musí vycházet z četnosti úderů blesků a rizika poškození konstrukce VE. Četnost úderů blesku do jakékoliv konstrukce je funkcí výšky konstrukce, tvaru místního terénu a místní úrovně bleskové aktivity.

Předpokládejme například výstavbu větrné elektrárny na vyvýšeném místě v oblasti Vysočiny. VE má výšku středu rotoru 50 m a průměr rotoru 60 m, tzn. že listy vrcholu dosahují v horní úvrati výšky 80 m. V daném regionu je podle [1] roční průměrná četnost úderů blesku do 1 km² země za rok $N_g = 2,7 / \text{km}^2$ a rok. Pro tuto oblast je také v [1] udáván počet bouřkových dní v roce $T_d = 28$, takže hustotu úderů lze vypočítat také podle vzorce

$$N_g = 0,04 \times T_d^{1,25} = 0,04 \times 28^{1,25} = 2,58 \quad (1)$$

Průměrný roční počet přímých úderů blesku do konstrukce N_d určíme podle vzorce (2)

$$N_d = N_g \times A_d \times C_d \times 10^{-6}$$

Ekvivalentní sběrná oblast A_d tvoří kruh s poloměrem rovným trojnásobku výšky VE $h = 80$ m

$$A_d = \pi(3h)^2 = 3,14 \times 9 \times 6400 = 180\,864 \text{ m}^2 = 0,181 \text{ km}^2$$

Činitel prostředí C_d volíme $C_d = 1,5$ pro VE umístěnou na částečně vyvýšeném místě. Vezmeme-li $N_g = 2,7$ úderů na km² a rok, potom roční průměrná četnost úderů N_d do VE bude

$$N_d = N_g \times A_d \times C_d = 2,7 \times 0,181 \times 1,5 = 0,733 \text{ úderu do VE za rok}$$

Údery blesku se liší svými parametry, zejména vrcholovou hodnotou proudu, strmostí čela, dobou půltýlu a celkovým nábojem výboje. Výskyt určitých velikostí těchto parametrů má v přírodě statistický charakter.

Z hlediska ničivých účinků jsou nejhorší blesky s velkým proudem, velkou strmostí nárůstu proudu (krátkou dobou čela), dlouhým týlem a mnoha následnými výboji. Velký vrcholový proud znamená velkou koncentraci tepelných účinků do jednoho okamžiku, dlouhý týl a následné výboje určují velkou celkovou energii, velká strmost nárůstu proudu a mnoho následných výbojů určují velké přepětové namáhání a velké rušivé sekundární účinky.

Bleskosvodný systém ochrany VE před bleskem

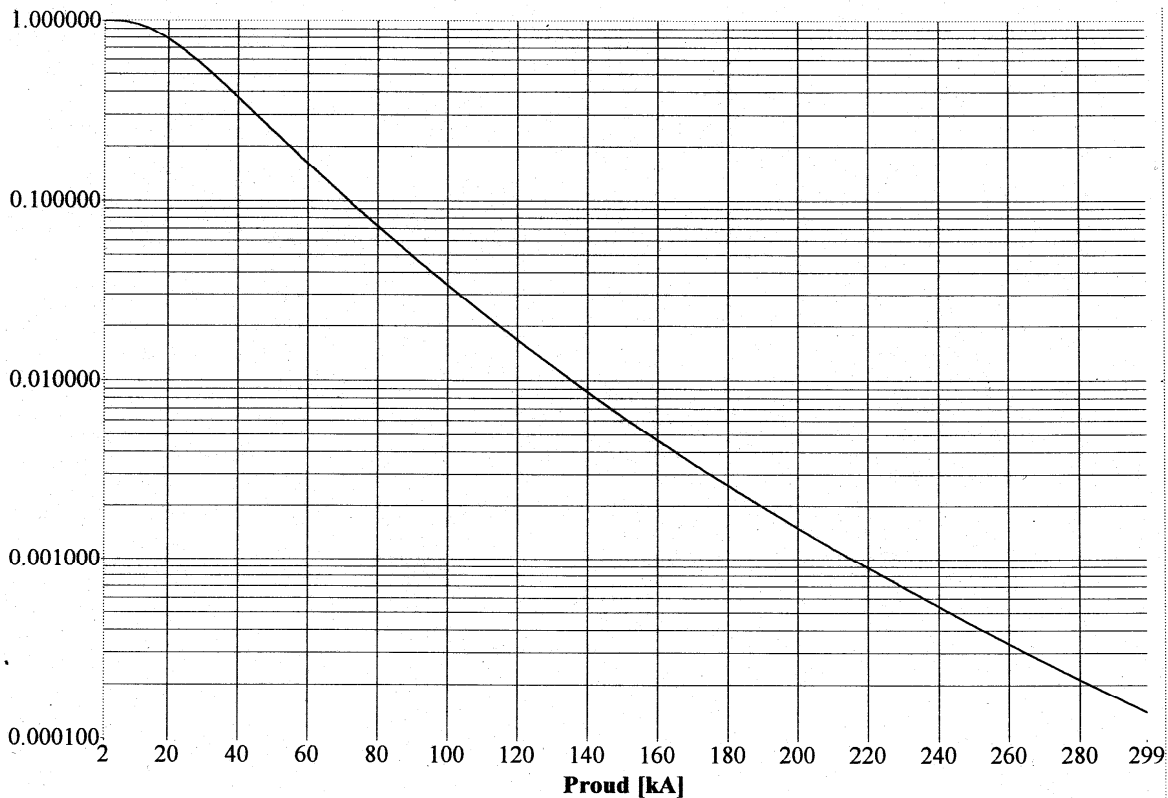
Každý systém ochrany je dimenzovaný na úder blesku určitých parametrů (např. vrcholové hodnoty proudu) a ne větší.

Jak je uvedeno v základním textu, IEC 61024-1 definuje 4 úrovně systémů ochrany před bleskem, úroveň I až IV (viz tabulka 10). Systém ochrany před bleskem u hladiny I musí být například schopen odolat bez poškození vrcholovému proudu 200 kA.

Četnost výskytu blesků s velkým proudem

Důležitá je tedy četnost výskytu blesků s velkým proudem. Zatímco u blesků střední velikosti proudu se autoři různých statistik na četnostech shodují, pro velké hodnoty proudu blesku nad 100 kA se autoři

četnostních křivek poněkud rozcházejí. V grafu 1 je četnost úderu v závislosti na vrcholové hodnotě proudu blesku podle CIGRE v semilogaritmickém zobrazení pro snadný odečet četnosti blesků s velkými proudy. Číselný údaj četnosti v rozsahu 0 až 1 (osa Y) znamená poměrný výskyt blesku s daným proudem a větším. Např. blesk s proudem 220 kA se vyskytuje s četností 0,0009, tzn. že jeden blesk z počtu $1/0,0009 = 1110$ blesků má tento proud nebo větší.



Obrázek B.1 - Relativní četnost úderu v závislosti na vrcholové hodnotě proudu blesku – semilogaritmické zobrazení pro velké proudy

K posouzení účinnosti ochrany mohou existovat dva přístupy:

1) Pro stávající ochranu, která vydrží určité parametry blesku, např. proud 150 kA (hladina II podle tabulky 10) se vypočte četnost úderu blesku s větším proudem, při němž může dojít k poškození lopatky nebo jiné části VE. Převratná hodnota této četnosti je potom střední doba mezi poruchami dané VE.

2) Pro požadovanou minimální přípustnou dobu mezi poruchami se vypočte vrcholová hodnota proudu blesku odpovídající četnosti takového úderu a systém ochrany musí být dimenzován na blesk s tímto proudem a nižším.

1) Výpočet střední doby mezi poruchami pro stávající systém

Ochranný systém vydrží proud 150 kA, neboli nevydrží úder, který překročí tuto hodnotu proudu. Z grafu 1 odečteme, že relativní četnost blesků s proudem větším než 150 kA $n_{150} = 0,0065$. Tzn., že jeden blesk z počtu 154, které udeří do VE, má tuto velikost a větší.

Při známé průměrné četnosti úderů blesku do VE za rok $N_d = 0,773$ můžeme vypočítat četnost úderů N_{150} , při nichž dojde v daném případě k překročení výdržných hodnot VE

$$N_{150} = N_d \times n_{150} = 0,773 \times 0,0065 = 0,00502$$

a může při nich dojít k poškození VE. Převratná hodnota je tzv. střední doba mezi poruchami S_{dp}

$$S_{dp} = 1 / N_{150} = 1 / 0,00502 = 200 \text{ let}$$

Znamená to, že statisticky v průměru může dojít jednou za 200 let k poškození VE úderem blesku.

Vypočtená střední doba poruchy způsobené bleskem je poměrně nízká a lze ji interpretovat i tak, že v případě výstavby větrné farmy v dané oblasti s počtem 20 VE dojde k poruše zapříčiněné úderem blesku v průměru každých 10 let.

Proto je nutné požadovat dosažení nižších hodnot četnosti poruch a tím pádem i dosažení delší doby mezi poruchami VE způsobených bleskem.

2) Výpočet výdržných hodnot systému ochrany pro požadovanou střední dobu mezi poruchami

Budeme např. požadovat, aby střední doba mezi poruchami jedné VE způsobené bleskem v dané oblasti byla 1000 let - tuto dobu lze považovat za přiměřenou.

Četnost události, při níž dojde k překročení výdržných hodnot musí být $N_x = 0,001$. Při známé četnosti $N_d = 0,773$ je potom požadovaná relativní četnost úderu blesku, který překročí výdržné hodnoty systému ochrany

$$n_x = N_x / N_d = 0,001 / 0,773 = 0,001294$$

Nyní je nutné najít v grafu 1 vrcholovou hodnotu proudu blesku s touto relativní četností. Tato hodnota je přibližně 200 kA.

Pro dosažení střední doby mezi poruchami způsobenými bleskem u jedné VE umístěné na vyvýšeném místě v oblasti Vysočiny je nutné, aby systém bleskové ochrany VE vydržel účinky blesku s vrcholovou hodnotou proudu 200 kA.

Požadovaná výdržná schopnost bleskosvodných systémů se zkouší impulzní proudovou zkouškou pomocí impulzního generátoru.

Účinnost zachycení úderu blesku

Účinnost zachycení úderu blesku do míst, která svedou blesk bez poškození lopatek se také zjišťuje experimentálně, provádějí se tři typy zkoušek:

- zkouška míst vstupu blesku výbojem z impulsního generátoru napětí na modelu VE
- zkouška výbojem z impulsního generátoru napětí na reálných částech lopatek
- zkouška vysokoproudovým impulsem míst vstupu blesku a proudových drah

Zkoušky na sebe navazují a vzájemně se doplňují.

Výsledkem zkoušek je zjištěná relativní četnost úderů blesku poškozujících lopatky v závislosti na vrcholové hodnotě proudu blesku. Při známé četnosti úderů blesku do VE je potom možné obdobně jako u bleskosvodných systémů určit střední dobu mezi poruchami zapříčiněnými úderem blesku do nechráněných částí, nebo překročením proudové výdržné hodnoty místa vniku úderu.

Ochrana řídicího systému před bleskem

Obdobným způsobem lze určit též výdržné hodnoty pro ostatní části VE, např. pro ochranu řídicího systému VE. Přitom je nutno znát mezní parametry blesku, které ještě nezpůsobí poruchu řídicího systému. Těmito parametry nemusí být pouze vrcholová hodnota proudu blesku, ale také strmost jeho nárůstu.

[1] "Analýza a aktualizace poznatků o bouřkové činnosti na území ČR pro účely koordinace izolace", dílčí zpráva EGÚ Brno k úkolu ČEZ DPS Koordinace izolace zařízení přenosové soustavy ČEZ, květen 1998