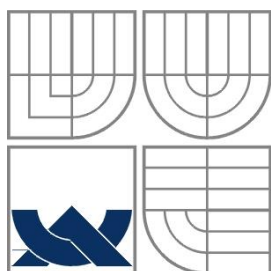
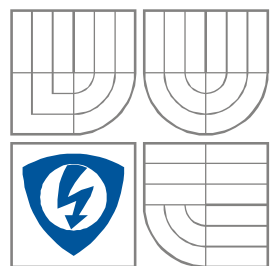


BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

VLIV PŘÍRODNÍCH JEVŮ NA ELEKTRICKÁ ZAŘÍZENÍ

AN EFFECT OF NATURAL PHENOMENA ON ELECTRICAL DEVICES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

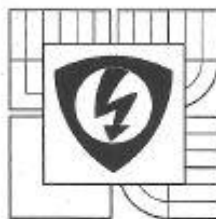
AUTHOR

Michal Müller

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Michal Müller

Ročník: 3

ID: 147633

Akademický rok: 2013/14

NÁZEV TÉMATU:

Vliv přírodních jevů na elektrická zařízení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Posuďte četná působení přírodních jevů na spolehlivost elektrických zařízení.
2. Analyzujte atmosférické jevy včetně působení slunce na elektrická zařízení.
3. Navrhněte opatření na snížení vlivu přírodních jevů na venkovní elektrická zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Krychtálek, Z., Pauya, J.: Elektrické stanice. SNTL, 1989

Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 2.6.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vlivem přírodních jevů na elektrická zařízení. Popisuje různé přírodní jevy a ukazuje, jak působí, na co působí a co je zdrojem jejich působení. Hlavním bodem práce je problematika atmosférického náboje (bouřka, blesk) a problematika výtrysku koronální hmoty (CME). Práce ukazuje příčině-následkový řetězec událostí při interakci plazmy z CME s magnetosférou Země a následné problémy v elektrické síti. Jsou zmíněny historické události týkající se této problematiky a popis událostí v Quebecu – zatím nejvýznamnější blackout způsobený CME. V závěru jsou nastíněny možné způsoby jak tyto blackouty eliminovat.

Abstract

The Thesis deals with the impact of natural effects on electrical equipment. It describes the various natural effects and shows how it impacts, what it impacts on and what the source of its impact is. The main point of this Thesis is the issue of atmospheric charge (storm and lightning) and the issue of coronal mass ejection (CME). The Thesis shows causally consequences string of geomagnetical field disturbances and resultant power system impacts. There are mentioned historic storm events and power system impacts and description of events in Hydro-Quebec – the most important event. Of this species. At the end there are shows possible way of mitigation power system impacts.

Klíčová slova

výtrysk koronální hmoty (CME), indukovaný proud (GIC), elektrická síť, transformátor, blackout, elektrické zařízení, atmosférický náboj, atmosférický výboj - blesk

Keywords

coronal mass ejection (CME), geomagnetical induced current (GIC), power grid, transformer, blackout, electrical equipment, atmospheric charge , atmospheric discharge - lightning

Bibliografická citace

MÜLLER, M. *Vliv přírodních jevů na elektrická zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Vliv přírodních jevů na elektrická zařízení* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Bohuslavovi Bušovovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne Podpis autora

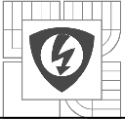


OBSAH

1 Úvod	11
2 Přírodní jevy ovlivňující spolehlivost elektrických zařízení	12
2.1 Rozdělení přírodních jevů podle zdroje působení	12
2.2 Rozdělení přírodních jevů podle kategorie postiženého objektu	12
2.3 Rozdělení přírodních jevů podle druhu působení	12
2.4 Jednotlivé přírodní jevy	13
2.4.1 Vzdušná vlhkost	13
2.4.2 Déšť	13
2.4.3 Kroupy	14
2.4.4 Sníh	15
2.4.5 Námraza	15
2.4.6 Teplota	16
2.4.7 Vítr	17
2.4.8 Cizí tělesa	18
2.4.9 Přítomnost ionizovaných částic	18
2.4.10 Blesk	19
2.4.11 Sluneční záření	19
2.4.12 Výron koronální hmoty ze Slunce (CME)	19
2.4.13 Seizmické působení	19
2.4.14 Kombinace jevů	19
3 Atmosférické jevy	20
3.1 Atmosférický náboj a jevy s ním spojené	20
3.1.1 Elektrické pole v atmosféře	20
3.1.2 Elektrický proud v atmosféře	20
3.1.3 Bouřky	21
3.1.4 Blesk	24
3.2 Kosmické počasí a jevy s ním spojené	27
4 Vliv výtrysku koronální hmoty (CME)	28
4.1 Sluneční vítr	28
4.1.1 Polární záře	29



4.2 Vznik výtrysku koronální hmoty (CME)	29
4.3 Magnetické pole Země	30
4.4 Jak výtrysk koronální hmoty (CME) působí na zemskou magnetosféru	31
4.5 Puls vzniklý při výbuchu jaderné bomby	32
4.6 Jak vzniklý elektromagnetický puls působí na elektrickou síť	33
4.7 Vznik proudu indukovaného geomagnetickou bouří (GIC).....	33
4.7.1 Výpočet proudu indukovaného geomagnetickou bouří (GIC) na hypotetickém vedení	34
4.8 Jak proud indukovaný geomagnetickou bouří (GIC) ovlivňuje zařízení fungující v síti	36
4.8.1 Vliv geomagnetické bouře na transformátory	36
4.8.2 Rozdílová ochrana, funkce a její citlivost na vyšší harmonické	38
4.8.3 SVC (Statický Var kompenzátor)	38
4.9 Blackout způsobený výtryskem koronální hmoty (CME).....	39
4.10 Historie výskytu výpadků proudu v důsledku Sluneční aktivity.....	39
4.10.1 Popis událostí v Quebecu	40
5 Možnosti snížení vlivů	44
5.1 Možnosti snížení vlivu výtrysku koronální hmoty (CME) na elektrickou síť	44
5.1.1 Technická opatření vedoucí ke snížení proudu indukovaného geomagnetickou bouří (GIC).....	44
5.1.2 Provozní postupy při hrozící geomagnetické bouři.....	45
5.1.3 Předpovědi hrozících geomagnetických bouří	46
6 Závěr.....	47
literatura	48



SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 a) rozdělení potenciálu nad zemí, b) rozdělení potenciálu v blízkosti člověka stojícího na otevřeném rovinném prostranství [6, s. 159]	20
Obr. 2 Střední denní variace gradientu potenciálu v atmosféře za jasného dne nad oceány, údaje se vztahují ke greenwickskému času [6, s. 162]	21
Obr. 3 Zralá bouřková buňka [6, s. 166]	22
Obr. 4 Teorie C. T. R. Wilsona o oddělování nábojů v bouřkovém oblaku	23
Obr. 5 Rozdělení náboje v bouřkové buňce [6, s. 168]	23
Obr. 6: Vůdčí výboj [6, s. 172]	24
Obr. 7: Zpětný úder [6, s. 172]	25
Obr. 8 Sluneční vítr opouštějící povrch Slunce (12 str. 106)	28
Obr. 9 CME (coronal mass ejection) – výron koronální hmoty ze Slunce [11]	30
Obr. 10 Deformované magnetické pole Země a dráha družic CLUSTER (bílá čárkovaná elipsa) [8, s. 109]	31
Obr. 11 Indukční smyčka tvořená vedením, uzemněnými neutrálními body transformátorů a zemí	34
Obr. 12 A) Síťové napětí posunuté přítomností naindukované ss složky a jemu odpovídající magnetická indukce v jádře transformátoru. B) Hysterezní smyčka materiálu jádra transformátoru. C) Deformovaný proud odebíraný přesyceným transformátorem.	37
Obr. 13 Rozdílová ochrana - principiální zapojení [15]	38
Obr. 14 SVC (Var kompenzátor) [17, s. 44]	39
Obr. 15 Rychlost změny magnetické indukce, záznamy v časech 2:43 až 2:46 EST, týká se pulsu, který způsobil kolaps Hydro-Quebecu [12]	41
Obr. 16 Změřený RGI v oblasti New Yorku, New Englandu a Quebecu 13. až 14. března 1989 [12]	41
Obr. 17 Velikosti RGI v postižených oblastech při jednom z pěti pulzů během geomagnetické bouře 1989 [12]	42
Obr. 18 Výčet a místo poruch při jednom z pěti pulzů během geomagnetické bouře 1989 [12]	42
Obr. 19 Vyhořelý transformátor v jaderné elektrárně Salem [12]	43
Obr. 20 Zařazení odporů mezi neutrální bod transformátorů a zemnicí soustavu za účelem snížení GIC	44



SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Charakteristiky deště (1 str. 7)	14
Tab. 2 Vnější vlivy – voda (2 str. 13).....	14
Tab. 3 Charakteristiky krup (1 str. 8)	15
Tab. 4 Výpočet referenčního zatížení námrazou I_R ve výšce 10 m (3).....	16
Tab. 5 Referenční rychlosti a součinitele nadmořské výšky (3 str. 108)	17
Tab. 6 Kategorie terénu podle Eurokódu ENV 1991-2-4 (3 str. 108).....	17
Tab. 7 Vnější vlivy – cizí tělesa (2 str. 13)	18



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

CME – coronal mass ejections – výtrysk koronální hmoty

GIC – geomagnetically induced currents – proud indukovaný geomagnetickým polem

EZ – elektrické zařízení

GPS – global positioning systém – globální poziční systém

EE – elektrická energie

EMP – electromagnetic pulse – elektromagnetický puls

HEMP – high-altitude electromagnetic pulse – elektromagnetický puls vzniklý ve velkých výškách

EST – Eastern standard time – Východní standardní čas

RGI – regional GIC index

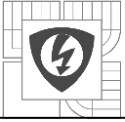
SVC – static Var compensator – statický Var kompenzátor



1 ÚVOD

Přírodní jevy působí na elektrická zařízení mnohými vlivy. Pokud chceme zajistit bezporuchový chod elektrických zařízení, tak tyto vlivy musíme znát, musíme jim rozumět, musíme je umět analyzovat a musíme vědět jak minimalizovat jejich negativní vliv. Přírodních jevů působících na elektrická zařízení je velké množství. Liší se svou významností, mechanismem působení, zdrojem působení a cílem působení. Jistě by šlo vyjmenovat další možné způsoby klasifikace. Tato práce se zabývá především přehledem nejvýznamnějších přírodních jevů, které nějakým způsobem působí na elektrická zařízení. Důkladněji je probrána problematika atmosférického náboje a jevů s ním spojených a to bouřky a blesku. V poslední části je uvedena problematika kosmického počasí a jeho vlivu na orbitální i pozemská elektrická zařízení a možná opatření vedoucí ke snížení těchto působení.

Zpracované téma může být zajímavé jak pro oblast elektroenergetiky, tak pro oblast elektrických přístrojů. Existuje minimum prací s obdobným tématem. Z těchto důvodů je vhodné se danému tématu věnovat.



2 PŘÍRODNÍ JEVY OVLIVŇUJÍCÍ SPOLEHLIVOST ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ

2.1 Rozdělení přírodních jevů podle zdroje působení

Přírodní jev je velice široký pojem. Pro účely této práce definuji fundamentální přírodní jev a komplexní přírodní jev. Fundamentální přírodní jev je jev, který probíhá na základě základního fyzikálního zákona, například gravitační přitažlivost. Komplexní přírodní jev je jev, který je složený z fundamentálních přírodních jevů, například déšť, kde se uplatňuje řada fyzikálních jevů. V této práci se budu zabývat přírodními jevy komplexními. Přírodní jevy nějakým způsobem působící na elektrická zařízení jsou z velké většiny atmosférické jevy. Výjimkou je například zemská radioaktivita.

2.2 Rozdělení přírodních jevů podle kategorie postiženého objektu

Různé jevy působí na různá elektrická zařízení. Kategorie elektrických zařízení:

1. Silové obvody
2. Elektronické obvody

2.3 Rozdělení přírodních jevů podle druhu působení

Podle způsobu, jakým daný jev působí na elektrické zařízení, budu rozdělovat přírodní jevy na:

1. jevy snižující elektrickou pevnost izolátorů mezi živými částmi elektrického zařízení
2. elektromagnetické přírodní jevy
3. jevy způsobující chemickou změnu (koroze, oxidace kontaktů, ...)
4. jevy měnící elektrické vlastnosti materiálů elektrických zařízení
5. jevy mechanicky zatěžující části elektrických zařízení.

Ad 1

Určité přírodní jevy způsobují snížení elektrické pevnosti izolátorů (vzduchu, mechanických izolátorů). Pak dochází k obloukovým výbojům nebo k vytvoření proudovodné cesty nějakým cizím médiem (například vrstvou vody) a tím ke zkratům. Těmito jevy jsou například vzdušná vlhkost, déšť, přítomnost ionizovaných částic ve vzduchu atd.

Ad 2

Určité přírodní jevy působí na EZ přímo elektromagnetickým polem nebo do EZ přivádějí cizí vnější náboje.

Ad 3

Určité přírodní jevy způsobují chemickou změnu materiálů, což přináší problémy například v případě zoxidovaných kontaktů.

Ad 4



Určité přírodní jevy způsobí, že proudovodné části EZ změni svoje elektrické vlastnosti (například změna odporu při zvýšení teploty u vodičů)

Ad 5

Určité přírodní jevy působí na elektrická zařízení přímo silovým účinkem nebo mění vlastnosti částí elektrických zařízení (hmotnost, objem) a tyto změny následně vyvolávají silové působení.

2.4 Jednotlivé přírodní jevy

2.4.1 Vzdušná vlhkost

Vlhký vzduch je přírodní atmosférický jev snižující elektrickou pevnost izolátorů a jev způsobující chemickou změnu elektrických součástí (oxidace kontaktů, koroze AlFe lan). Vlhký vzduch je lepším vodičem než vzduch suchý, proto vlhkost obsažená ve vzduchu snižuje elektrickou pevnost vzduchu mezi fázemi a mezi fází a zemí. Vzdušná vlhkost za určitých podmínek může kondenzovat na mechanických izolátorech a tím snižovat jejich povrchovou elektrickou pevnost.

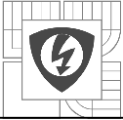
2.4.2 Déšť

Déšť patří ještě vedle sněhu a krup mezi srážky. Na elektrická zařízení působí podobně jako vzdušná vlhkost. Výskyt vody v podobě kapek ve vzduchu snižuje elektrickou pevnost vzduchu. Zároveň přispívá k zvyšování vzdušné vlhkosti. Dešťové kapky smáčí povrch mechanických izolátorů, tím snižují jejich povrchovou elektrickou pevnost. Přímou dešťová voda nebo následně vzniklá vlhkost působí na elektrická zařízení chemickou změnou.

Podle ČSN EN 60721-2-2 [1, s. 6] je déšť charakterizován těmito fyzikálními parametry:

1. intenzitou deště [mm/h]
2. velikostí kapek – typický průměr 1 mm až 2 mm, bouřkové kapky 5 mm až 8 mm
3. rychlostí pádu [m/s], 2 m/s až 12 m/s
4. teplotou dešťových kapek

Významný vliv může mít také obsah rozpuštěných látek v dešťových kapkách.



Tab. 1 Charakteristiky deště [1, s. 7]

Typ deště	Horní mez intenzity deště
	mm/h
Velmi slabý déšť, mrholení	0,25
Slabý déšť	1,0
Mírný déšť	4,0
Silný déšť	16
Velmi silný déšť	50
Extrémní déšť	>50

Normální déšť obsahuje kapky různých rychlostí a velikostí, které závisí především na teplotě a vzdušné vlhkosti. Kapka se při pádu odpařuje a mnohdy na zem vůbec nemusí spadnout. Největší dešťové kapky jsou v tropických oblastech [1, s. 9].

Déšť patří podle ČSN EN 33 2000-5-51 ed. 3 k vnějším vlivům a spadá do skupiny voda (AD). Podobný vliv na EZ jako déšť mají i ostatní jevy ze skupiny AD, které shrnuje Tab. 2.

Tab. 2 Vnější vlivy – voda [2, s. 13]

AD	Voda
AD1	zanedbatelná
AD2	volně padající kapky
AD3	vodní tříšť
AD4	stříkající voda
AD5	tryskající voda
AD6	vlny
AD7	mělké ponoření
AD8	hluboké ponoření

2.4.3 Kroupy

Kroupy mohou na elektrická zařízení působit mechanicky. Ale obecně nejsou primárním problémem. Podle ČSN EN 60721-2-2 [1, s. 7] jsou kroupy charakterizovány následujícími fyzikálními parametry:

1. průměrem - 5 mm až 15 mm
2. hustotou
3. rychlostí pádu
4. energií nárazu
5. hodnotou aerodynamického odporu (C_d), typicky 0,6

Při pádu se rychlost kroupy ustálí. Velikost rychlosti je určena následujícím vzorcem:

$$v = \sqrt{\frac{2mg}{\rho C_d A}}$$

kde je



- v rychlost pádu;
m hmotnost kroupy;
g tíhové zrychlení;
 C_d součinitel aerodynamického odporu;
 ρ hustota vzduchu;
A obsah průřezu čelní plochy.

Energie nárazu kroupy se vypočte podle její kinetické energie před dopadem:

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Tab. 3 Charakteristiky krup [1, s. 8]

Průměr mm	Hmotnost g	Rychlost pádu m/s	Energie nárazu J
20	4	18	1
50	59	28	24
60	102	31	49
70	162	34	91
80	241	36	155
90	344	38	248
100	471	40	378

POZNÁMKA Hodnoty jsou zaokrouhleny.

2.4.4 Sníh

Obecně samostatný sníh není primárním problémem elektrických zařízení. Na EZ působí spíše v kombinaci s větrem. Pak podle ČSN EN 60721-2-2 [1, s. 10] mluvíme o nízko zvěřeném sněhu. Vítr krystalky sněhu rozmělní na velice drobné částice, které mohou pronikat do EZ.

Zvěřený sníh je jev snižující elektrickou pevnost vzduchu, povrchovou elektrickou pevnost mechanických izolátorů a po roztátí má stejné účinky jako dešťová voda.

2.4.5 Námraza

K námraze dochází při meteorologickém jevu nazývaném teplotní inverze, kdy teplota s rostoucí výškou neklesá, jak je tomu obvykle, ale stoupá. Teplota v nižších částech atmosféry je pak nižší než ve vyšších částech atmosféry. Inverze je zpravidla doprovázena meteorologickým jevem nazývaným mlha – suspenze velmi malých kapiček vody. Tyto kapičky vody jsou podchlazené (podchlazená voda je voda vyskytující se pod bodem mrazu v kapalném skupenství). Pak stačí sebemenší impuls, aby voda zmrzla (srážka s prachovým zrnem, dopad na nějaké cizí těleso – sklo, list stromu, vodič), tak se vytváří vrstva námrazy na vodičích venkovního vedení. Námraza zvyšuje celkovou hmotnost vodiče a tím silové namáhání izolátorů a sloupů a zvětšování průhybu vodiče. Vzniku námrazy na vodičích se musí zamezovat, protože případná oprava vzniklých škod je velice



náročná. V rozvodnách (kde je stále nějaká obsluha) se námraza z vodičů sklepává izolačními tyčemi. V odlehlých částech elektrického vedení je tato možnost neefektivní, proto se používá vyhřívání vodičů proudem. Vodičem prochází takový proud, aby činné ztráty na odporu rozpustili část námrazy a ta poté opadla. Stanovení zatížení námrazou pro venkovní vedení se provádí pro námrazu tvořenou jinovatkou, která má hustotu 500 kg/m^3 . Pro účely výpočtu definujeme referenční zatížení námrazou I_R [N/m], které je definováno pro vodič 10 metrů nad zemí. Rovnice pro výpočet referenčního zatížení je závislá na tom, v jaké námrazové oblasti se vedení nachází [3, s. 106 - 107], [4]. To shrnuje Tab. 4.

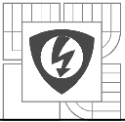
Tab. 4 Výpočet referenčního zatížení námrazou I_R ve výšce 10 m [3]

Námrazová oblast	Hmotnost námrazy na měřící tyči o průměru 30 mm s dobou návratu 20 let m_R (kg/m)	Referenční zatížení námrazou I_R (N/m) na jednotku délky vodiče o průměru d (mm)	
		$d \leq 30 \text{ mm}$	$d > 30 \text{ mm}$
N0	0,5	$1,298 + 0,1562 d$	$5,267 + 0,0239 d$
N1	1	$3,873 + 0,2698 d$	$10,566 + 0,0467 d$
N2	2	$10,566 + 0,4457 d$	$21,423 + 0,0838 d$
N3	3	$18,305 + 0,5866 d$	$33,032 + 0,0957 d$
N5	5	$35,376 + 0,8155 d$	$55,569 + 0,1424 d$
N8	8	$63,077 + 1,0890 d$	$90,254 + 0,1831 d$
N12	12	$102,063 + 1,3852 d$	143,619
N18	18	$162,924 + 1,7501 d$	215,427
NK	>18	Stanoví se individuálně	

2.4.6 Teplota

Změna teploty je přírodní jev (může být i jevem umělým, pokud zdrojem změny není přírodní pochod) primárně způsobující změny elektrických vlastností materiálů obsažených v EZ. A to především změnu odporu. Teplota také ovlivňuje elektrickou pevnost vzduchu. Změna teploty způsobuje objemovou změnu materiálu, tím nepřímo vyvolává mechanické zatížení EZ. Tento jev je nejvýraznější u vodičů venkovního vedení. Co se týče mechanického namáhání vodičů venkovního vedení, tak nás zajímá především délková roztažnost.

V našich podmínkách se počítá s rozmezím teplot $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ až $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Při nejvyšší možné teplotě se projeví největší délkové prodloužení a tím největší průhyb vodičů, ten je důležitý pro posouzení předepsané vzdálenosti od terénu. Při minimální teplotě nastává největší zkrácení vodičů, pak jsou tahové síly působící na izolátory a stožáry největší a může dojít k přetržení vodičů nebo ohnutí stožárů. [3, s. 106]



2.4.7 Vítr

Působení větru na elektrická zařízení je spojováno především s působením na vodiče a konstrukce venkovního vedení. Podle ENV 1991-2-4 se při určování účinků větru vychází ze střední hodnoty rychlosti větru v_{mean} . Území Česka je rozděleno na 2 oblasti, které jsou odlišné svou referenční rychlostí větru $v_{mean,0}$. Střední desetiminutová rychlost v_{mean} ve výšce 10 m nad zemí v relativně otevřeném terénu se vypočte

$$v_{mean} = c_{ALT} v_{mean,0}$$

kde c_{ALT} je součinitel nadmořské výšky určený z Tab. 5 [3, s. 108].

Tab. 5 referenční rychlosti a součinitele nadmořské výšky [3, s. 108]

větrová oblast	$v_{mean,0}$ [m/s]	Nadmořská výška H [m]	c_{ALT}
1	24	$H \leq 700$	1
		$700 < H \leq 1300$	1,25
2	26	$H \leq 700$	1
		$700 < H \leq 1300$	1,16

Poté se určí referenční rychlost větru v_R ve výšce 10 m nad zemí

$$v_R = k_T \cdot \ln\left(\frac{10}{z_0}\right) v_{mean}$$

kde k_T je součinitel terénu

z_0 je třecí výška

Tyto koeficienty získáme z Tab. 6.

Tab. 6 Kategorie terénu podle Eurokódu ENV 1991-2-4 [3, s. 108]

Kategorie terénu	Charakteristika terénu	k_T	z_0
I	Bouřlivé otevřené moře, jezera do vzdálenosti nejméně 5 km proti směru větru a rovná plochá krajina bez překážek	0,17	0,01
II	Zemědělská půda s hraničními živými ploty, rozptýlené malé zemědělské usedlosti, domy a stromy	0,19	0,05
III	Předměstské nebo průmyslové oblasti a trvale zalesněná území	0,22	0,30
IV	Městské oblasti, ve kterých je alespoň 15% povrchu pokryto pozemními stavbami s průměrnou výškou >15 m	0,24	1,0
V	Hornatý a více členitý terén, kde se vítr může místně zesilovat nebo zeslabovat	hodnotí se individuálně	



2.4.8 Cizí tělesa

Rozdělení cizích těles podle ČSN EN 33 2000-5-51 ed.3 ukazuje *Tab. 7 Vnější vlivy – cizí tělesa*

Tab. 7 Vnější vlivy – cizí tělesa [2, s. 13]

	cizí tělesa
AE1	zanedbatelná
AE2	malé předměty
AE3	velmi malé předměty
AE4	lehká prašnost
AE5	mírná prašnost
AE6	silná prašnost

Větší cizí tělesa mohou v EZ způsobit zkrat, pokud spojí dvě živé části nebo živou část a zem. Nejčastějším případem této poruchy je například větev spadlá na venkovní vodiče distribuční soustavy. Prach snižuje povrchovou elektrickou pevnost mechanických izolátorů, a pokud je přítomen ve vzduchu, tak snižuje elektrickou pevnost vzduchu. Prach se vzájemným třením při pohybu ve vzduchu může ionizovat a pak způsobuje mnohonásobně větší potíže. Přítomnost prachu ve spínacím prvku EZ zvyšuje odpor ve styku a zároveň díky snížené elektrické pevnosti vzduchu přispívá ke vzniku oblouku mezi pohyblivými kontakty. Oba tyto jevy přispívají ke zvýšenému tepelnému opotřebení kontaktů.

2.4.9 Přítomnost ionizovaných částic

Ionizované částice přítomné ve vzduchu výrazně snižují elektrickou pevnost vzduchu, proto jejich výskyt v jakémkoliv EZ je velký problém.

Vznik iontů v atmosféře probíhá několika různými způsoby. K ionizaci dochází především ve vrchní vrstvě atmosféry zvané ionosféra, kde korpuskulární a UV záření Slunce ionizuje molekuly vzduchu. Ionosféra se nachází ve výškách nad 60 km [5, s. 190].

Další ionizace v atmosféře je způsobena kosmickým zářením. Jako kosmické záření jsou označovány vysokoenergetické částice pocházející z kosmického prostoru. Pohybují se rychlostmi blízkými rychlosti světla a tomu také odpovídají jejich energie, které se pohybují od 10^8 eV do extrémních $5 \cdot 10^{20}$ eV na jeden nukleon. Dokud částice kosmického záření nedopadne do atmosféry, tak se nazývá primárním kosmickým zářením. Částice primárního kosmického záření při průletu atmosférou interagují s jádry kyslíku a dusíku a rozbíjejí je na nukleony nebo větší odštěpky. Z energie částice primárního kosmického záření také vznikají gama fotony. Tímto mechanismem z jedné primární částice kosmického záření může vzniknout až milion sekundárních částic a gama-fotonů. Energie primární částice se tak přemění ve spršku sekundárního kosmického záření, které má stejný směr rychlosti jako původní částice. Intenzita kosmického záření je nejvyšší pro nízké energie. Se zvyšující se energií intenzita klesá. Nízkoenergetická složka kosmického záření jsou částice s energiemi do $5 \cdot 10^{10}$ eV. Tato složka je časově proměnná, protože její intenzita je ovlivňována činností Slunce, které má jedenáctiletý cyklus. V době maxima sluneční činnosti je intenzita nízkoenergetické složky nejnižší, protože meziplanetární magnetické pole je nejsilnější a zastiňuje Zemi před touto nízkoenergetickou složkou. Částice kosmického záření s energiemi



mezi $5 \cdot 10^{10}$ eV a 10^{18} eV pochází stejně jako nízkoenergetické záření z galaktického prostoru. Směr jejich pohybu je silně ovlivněn mezihvězdným magnetickým polem. Z jejich směru nelze určit zdroj. To znamená, že je zcela izotropní [5, s. 224].

Dalším zdrojem ionizovaných molekul v atmosféře je přirozená radioaktivita půdy a blesk [5, s. 190]. Podle [6, s. 160] vznikají v atmosféře i nabitě částice větší než jednotlivé molekuly. Například velmi malá nabitá prachová zrníčka obsažená ve vzduchu. Nebo drobné nabitě krystalky NaCl vznikající při zhroucení vlny mořské vody.

2.4.10 Blesk

Blesk je průvodním jevem bouřky. Blesk je jedním z nejvýznamnějších přírodních jevů z hlediska působení na elektrická zařízení. Blesk na elektrická zařízení působí primárně tak, v nich způsobuje přepětí a nadproudy. To má za následek především porušení izolace, tepelnou destrukci, vlivem elektrodynamických sil mechanické poškození proudovodičů a jejich okolí.

2.4.11 Sluneční záření

Sluneční záření jmenovitě jeho UV složka způsobuje degradaci materiálu. Nejvíce postižené jsou především plastové materiály, které působením UV záření křehnou. Norma ČSN EN 33 2000-5-51 ed.3 [2, s. 36] rozděluje vliv slunečního záření podle intenzity do tří skupin:

1. AN1 – nízká úroveň – intenzita $\leq 500 \text{ W/m}^2$
2. AN2 – střední úroveň – $500 \text{ W/m}^2 < \text{intenzita} \leq 700 \text{ W/m}^2$
3. AN3 – vysoká úroveň - $700 \text{ W/m}^2 < \text{intenzita} \leq 1200 \text{ W/m}^2$

2.4.12 Výron koronální hmoty ze Slunce (CME)

Při silných erupcích může dojít k výronu koronální hmoty (CME) někdy nazývanému výbuchu Slunce.

2.4.13 Seizmické působení

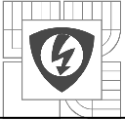
Seizmické účinky ovlivňují EZ mechanickým způsobem. Například může dojít ke zhroucení stožárů elektrické soustavy. Pokud je vlastní frekvence mechanických kmitů částí EZ v rozmezí frekvence seizmického zrychlení (0 Hz až 10 Hz), tak může dojít k rezonanci.

Podle ČSN EN 33 2000-5-51 ed.3 [2, s. 38] rozdělujeme seizmické účinky podle zrychlení, kterých je při otřesech dosahováno. Seizmické účinky rozdělujeme:

1. AP1 – zanedbatelné
2. AP2 – nízké ohrožení
3. AP3 – střední ohrožení
4. AP4 – vysoké ohrožení

2.4.14 Kombinace jevů

Mnohdy dochází ke kombinaci jevů a jejich účinky se mohou sčítat.



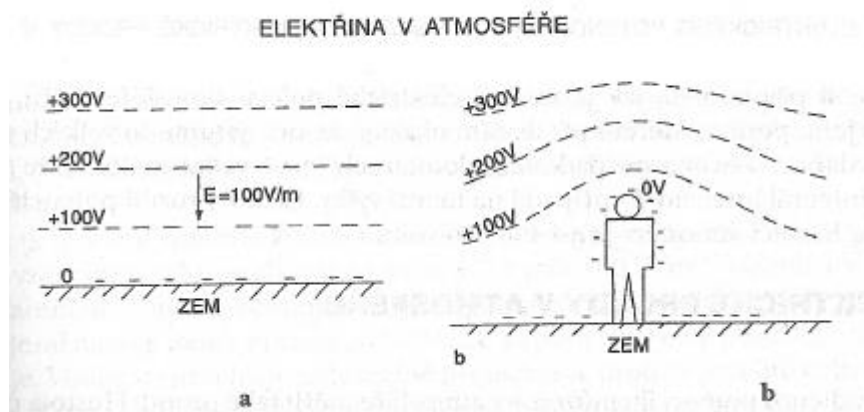
1. Déšť hnaný větrem
2. Zvířený sníh
3. Vítr působící na vegetaci okolo elektrického vedení – spadlé větve a stromy
4. Vítr a námraza

3 ATMOSFÉRICKÉ JEVY

3.1 Atmosférický náboj a jevy s ním spojené

3.1.1 Elektrické pole v atmosféře

Zemský povrch je záporně nabitý. Ve vzduchu existuje vertikální elektrické pole E o velikosti 100 V/m. To znamená, že za obyčejného dne v místě bez bouřkové aktivity a na rovinnatém terénu (moře, poušť, ...) vzrůstá elektrický potenciál o 100 voltů na metr od zemského povrchu. To platí, ale jen pro dříve zmíněnou rovinnatou krajinu, protože pokud je na zemi výčnělek, zaražená tyč nebo osoba, tak jsou tyto objekty na stejné ekvipotenciální hladině jako zemský povrch, jak ukazuje Obr. 1.



Obr. 1 a) rozdělení potenciálu nad zemí, b) rozdělení potenciálu v blízkosti člověka stojícího na otevřeném rovinném prostranství [6, s. 159]

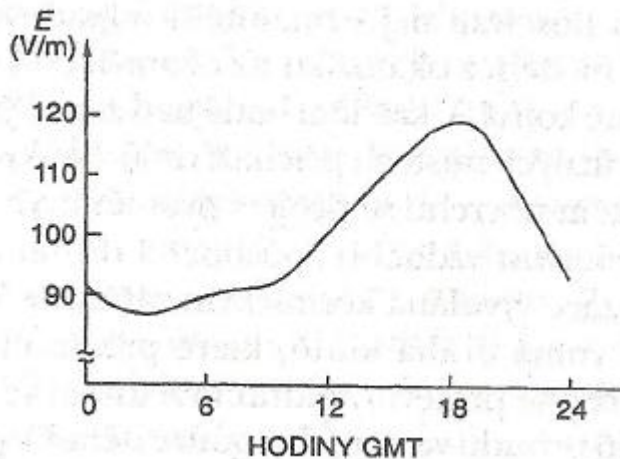
Tento fakt způsobuje to, že například přes tělo člověka neteče proud ze vzduchu do země. Od zemského povrchu po horní vrstvu atmosféry je celkový rozdíl potenciálu zhruba 400 000 voltů. [6, s. 158 - 160]

3.1.2 Elektrický proud v atmosféře

V atmosféře dochází několika různými mechanismy k ionizaci molekul, tím vznikají kladně nabitá jádra a volné elektrony. Jestliže se nabitě částice nacházejí v elektrickém poli, tak jsou tímto polem urychlovány. Ionty v atmosféře vznikají především vlivem kosmického záření, které v horních vrstvách atmosféry způsobuje disociaci molekul a následně ionizaci atomů, tak dostáváme kladně nabitě ionty a elektrony. Ve vzduchu se vznášejí droboučké částice prachu, prachová zrna, krystaly NaCl z mořské vody atd., tyto částice se vlivem tření nabíjejí a tím přinášejí do atmosféry další nabitě částice (přispívají k vodivosti vzduchu). Tyto ionty někdy nazýváme



„jádra“ nebo „velké ionty“. Jsou řádově hmotnější než ionty vytvořené kosmickým zářením někdy nazývané „malé ionty“. Od rozdílné hmotnosti se také odvíjí různá rychlost těchto iontů. Malé ionty jsou nejpohyblivější. V poli 100 V/m dosahují rychlosti 1 cm/s. Je-li jader hodně, tak přebírají náboje od malých iontů a vzhledem k tomu, že jádra jsou pomalejší, tak se snižuje vodivost vzduchu. Se vzrůstající výškou roste vodivost vzduchu a to ze dvou příčin: v horních vrstvách atmosféry je vyšší míra ionizace způsobená kosmickým zářením a s výškou klesá hustota vzduchu, takže ionty mají větší střední dráhu. V určité výšce je vodivost tak velká, že potenciál elektrického pole je v této výšce okolo celé Země stejný. To znamená, že ve výšce zhruba 50 km



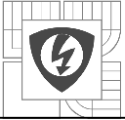
Obr. 2 Střední denní variace gradientu potenciálu v atmosféře za jasného dne nad oceány, údaje se vztahují ke greenwichskému času [6, s. 162]

existuje dokonale vodivá plocha, která zabraňuje tomu, aby se napětí mezi zemí a touto plochou měnilo v závislosti na místě. Z této vodivé plochy teče elektrický proud směrem k Zemi. Celkový elektrický proud dosahující zemského povrchu je 1800 A a do Země přivádí kladný náboj. Tento proud má celkem konstantní velikost v čase. Mění se asi o $\pm 15\%$. Maxima dosahuje v sedm večer a minima ve čtyři ráno londýnského času. Časová změna proudu kopíruje časovou změnu gradientu potenciálu, to ukazuje Obr. 2. [6, s. 160 - 162]

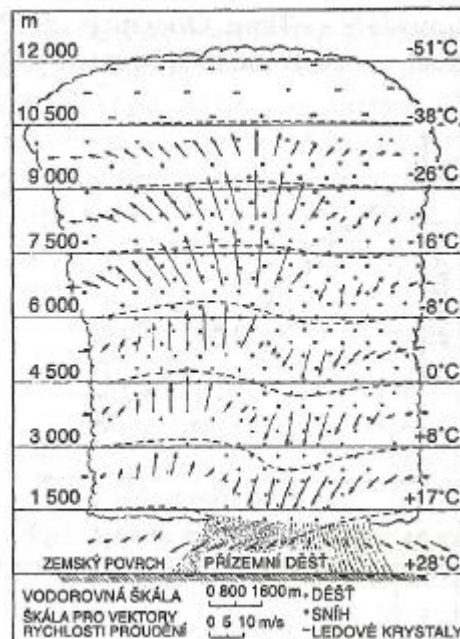
Vzniká otázka, jakým způsobem se dostává do země záporný náboj, aby mohl být udržován záporný náboj země. Je nasnadě, že kladný náboj tekoucí do země by za určitý čas vyrovnal záporný náboj země a ta by se stala elektricky neutrální. Tato otázka nás přivádí k problematice bouřky a jejímu doprovodnému jevu a to blesku.

3.1.3 Bouřky

Bouřky pomocí blesků přivádí do země záporný náboj, který se v oblastech s klidným počasím přivádí zpět do atmosféry. Za jeden den je na Zemi asi 40 000 bouřek, které udržují rozdíl napětí mezi zemí a atmosférou. Bouřku lze popsat jako množství nezávislých buněk, ve kterých probíhají všechny základní děje. Buňka je horizontálně omezená oblast, avšak vertikálně obsahuje celou bouřku. V počáteční fázi bouřky stoupá teplý (u země ohřátý vzduch) vzhůru. Za klidného počasí je u země také teplejší vzduch než ve velkých výškách a přesto teplý vzduch nahoru nestoupá. Je to způsobeno tím, že s výškou klesá tlak. Stoupající balík vzduchu se pak adiabaticky rozpíná a tím se ochlazuje. Ve výsledku by pak vzduch, který vystoupil z ohřátých vrstev atmosféry u země, měl



ve výšce nižší teplotu než okolní původní vzduch. Takže horký vzduch nemá důvod stoupat. To znamená, že vznik bouřky je podmíněn ještě něčím. Ke vzniku bouřky je potřeba horký a zároveň vlhký vzduch. Balík horkého vlhkého vzduchu bude stoupat a v důsledku adiabatického rozpínání se bude ochlazovat. Po teď je situace stejná, ale při určitém ochlazení začne vodní pára obsažená ve vzduchu kondenzovat a tím uvolňovat teplo. V důsledku toho se tento balík vlhkého vzduchu ochladí méně, než je obvyklé u suchého vzduchu. Stoupá stále výš do výšek 10 až 15 km a pohybuje se rychlostí přibližně 100 km/h. Pára obsažená ve vzduchu stále kondenzuje, tvoří malé kapičky, ty se ochlazují na teploty pod bodem mrazu vody, ale nemrznou, protože jsou přechlazené. V určité fázi přechlazené kapičky začnou mrznout. K prvním krystalkám ledu se



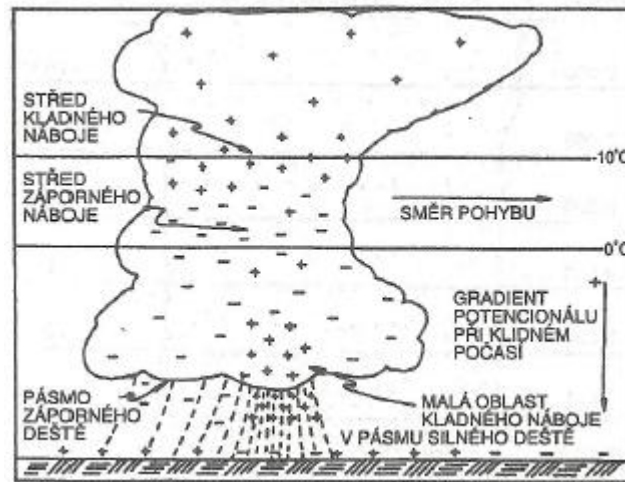
Obr. 3 Zralá bouřková buňka [6, s. 166]

přichytává další přechlazená voda a okamžitě mrzne. Vznikají tak velké částice ledu. V určité fázi začnou být částice ledu příliš těžké a začnou propadávat stoupajícím vzduchem. Při pádu strhávají okolní vzduch a zapříčiní sestupný proud. Jakmile se krystalky dostanou dolů, tak ze spodní části bouřkového mraku začne pršet [6, s. 163 - 165]. Zralou bouřkovou buňku ukazuje Obr. 3.

Posledním odstavcem bylo ukázáno, že bouřka je prostřednictvím stoupajícího vlhkého horkého vzduchu a prostřednictvím padajících kapek a částic ledu zdrojem kinetické energie. Aby se bouřka stala zdrojem elektrické energie, tak tuto kinetickou energii musí pomocí nějakého mechanismu použít k polarizaci bouřkového mraku. To znamená, že musí dojít k vertikálnímu oddělení kladně nabitých a záporně nabitých částic v rámci bouřkového mraku.

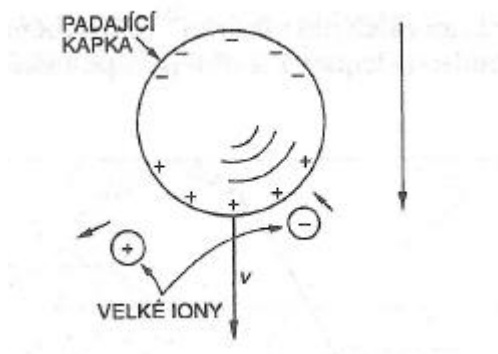


Možný mechanismus oddělování náboje v bouřkovém mraku je popsán v [6, s. 167 - 170]. Rozdělení náboje v bouřkové buňce ukazuje Obr. 5. Vrchní část bouřkové buňky je nabitá kladně



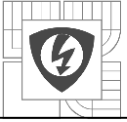
Obr. 5 Rozdělení náboje v bouřkové buňce [6, s. 168]

a spodní část záporně. Ve spodní části je malá lokální oblast kladného náboje. Obecně není jasné, jaký má význam a jakým mechanismem vzniká. Převážně záporný náboj ve spodní části bouřkové buňky vytváří mezi oblakem a zemí napětí 20 až 100 MV. To je mnohem více než 400 kV mezi zemí a vodivou vrstvou ve vrchní části atmosféry. Napětí mezi bouřkovým mrakem a zemí způsobuje elektrické průrazy vzduchu. Vznikají velké obloukové výboje – blesky, které přenášejí záporný náboj z oblaku do země. Je více teorií, které popisují mechanismus rozdělení náboje v bouřkovém mraku. Všechny předpokládají, že srážkové částice (kapky vody, částičky ledu) mají určitý náboj a vzduch má opačný náboj. Pak pohybem vzduchu nahoru v důsledku vzestupného proudění a pádem srážek dolů dochází k polarizaci bouřkového mraku. Zůstává otázka, jak se srážkové částice nabíjejí. Teorie C.T.R. Wilsona předpokládá padající vodní kapku s indukovaným dipólovým momentem s kladnou spodní a zápornou vrchní částí viz Obr. 4. Pokud se padající



Obr. 4 Teorie C. T. R. Wilsona o oddělování nábojů v bouřkovém oblaku

kapka přiblíží ke kladně nabitému velkému iontu, tak je tento iont spodní kladnou částí vodní kapky odpuzován a ve výsledku odstrčen z dosahu kapky. Naopak pokud padající kapka vody narazí na celkový záporný iont, tak je tento iont do kapky vtažen a kapka získává záporný náboj. Tímto mechanismem je záporný náboj přesouván do spodní části bouřkového mraku a kladné ionty jsou dále unášeny vzestupným proudem vzduchu. Teorie platí i pro částičky ledu, ve kterých



nastává polarizace dielektrika. Vzhledem k nedostatku velkých iontů v atmosféře teorie předpokládá vznik velkých iontů přímo v bouřkovém mraku. [6, s. 167 - 170]

Tyto pochody způsobí polarizaci bouřkového mraku, která je nezbytná k vytvoření blesku, což je z pohledu vlivu na elektrická zařízení jeden z nejvýznamnějších atmosférických jevů.

3.1.4 Blesk

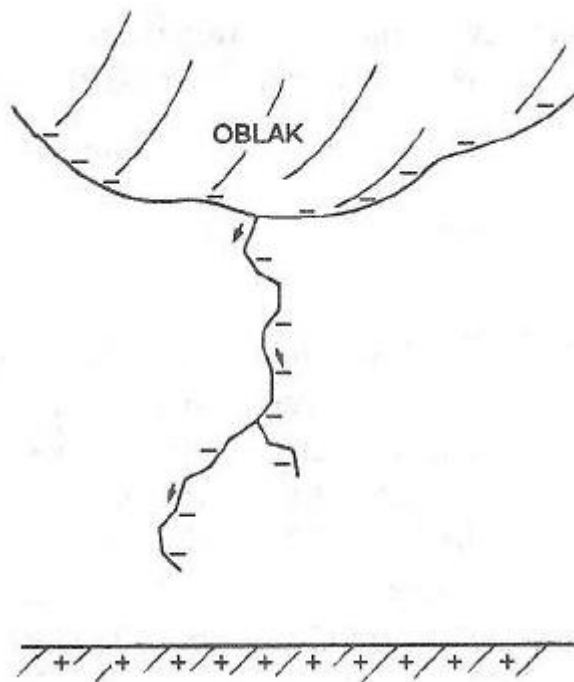
Podle [7, s. 14] dělíme atmosférické výboje na následující typy:

1. Negativní výboj mrak → zem
2. Negativní výboj zem → mrak
3. Pozitivní výboj mrak → zem
4. Pozitivní výboj zem → mrak

V ploché nepřilíš členité krajině s běžnými typy staveb se objevuje téměř výhradně typ výboje mrak → zem. Pouze u extrémně vysokých a ostrých objektů se objevuje výboj typu zem → mrak. Ze statistik vyplývá, že 90 % všech atmosférických výbojů je typu negativní výboj mrak → zem. [7, s. 15]

3.1.4.1 Vznik blesku

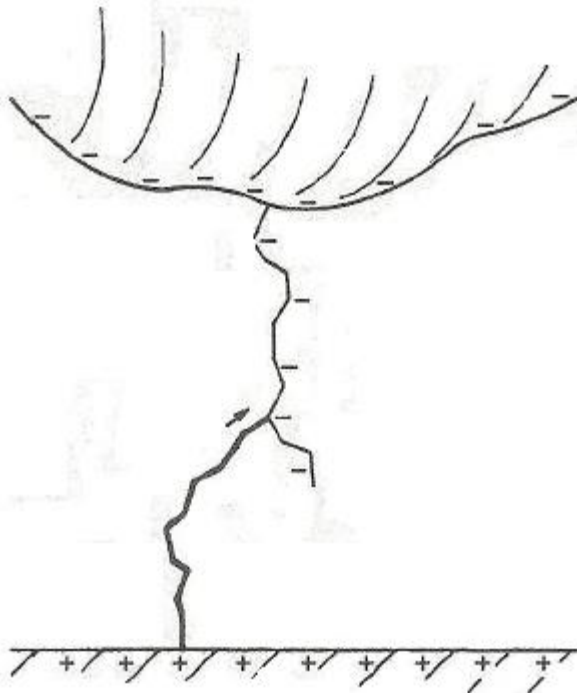
Následně popíšeme negativní výboj mrak – zem. Celý jev blesku začíná stupňovitým vůdčím výbojem. Celkem nenápadným jevem, který nemusí být zrovna snadno pozorovatelný, na rozdíl od hlavního výboje, který je charakteristický silným světelným efektem a je doprovázen zvukovým efektem hromu. Vůdčí výboj se k zemi pohybuje sérií kroků, kdy vyhledává cestu s nejmenším odporem. Urazí vzdálenost zhruba 50 metrů a pak se na 50 μ s zastaví. Z těchto kroků je složen celý jeho pohyb od mraku až k zemi. To ukazuje Obr. 6.



Obr. 6: Vůdčí výboj [6, s. 172]



Ve vůdčím výboji jsou záporné náboje ze spodní části bouřkového mraku, které při pohybu atmosférou ionizují okolní vzduch. Tím připravují vodivou cestu pro následující hlavní výboj. Ve chvíli, kdy se vůdčí výboj přiblíží k zemi zhruba na 100m, tak se k němu z povrchu země zvedne protisměrný výboj. Tento efekt je nejvýraznější, pokud je na zemi nějaký vysoký ostrý objekt (stožár, výšková budova, horský vrchol, vysoký strom). Ve chvíli, kdy se vůdčí výboj setká s protisměrným výbojem, tak je záporně nabitá spodní část mraku vodivě spojena s kladně nabitou zemí. Nyní může záporný náboj z mraku téct do kladně nabitě země. První vyteče záporný náboj ze spodní části vyhledávacího náboje. Nechá za sebou kladný náboj a ten přitáhne záporné náboje z vyšší části. Tak vzruch pokračuje až k mraku. Proto se světelný efekt, který vidíme při úderu blesku šíří zesponu nahoru. Tuto fázi nazýváme zpětný úder, který ukazuje Obr. 7.



Obr. 7: Zpětný úder [6, s. 172]

Tekoucí náboj zahřívá okolní vzduch, který pak vydává velmi jasné světlo. Prudká expanze ohřátého vzduchu způsobuje silnou akustickou vlnu – hrom. Vodivou cestou vytvořenou vůdčím výbojem vyteče veškerý záporný náboj z určité části mraku. Proud úderu blesku dosahuje v maximu několika kA a přenesení do země náboj zhruba 20 C. Za několik setin sekundy po vyhasnutí hlavního výboje, přichází dolů další výboj, nazývaný temný vůdčí výboj. Je opět plný záporného náboje a jde po původní cestě, která obsahuje ještě část původních ionizovaných molekul. Ve chvíli, kdy se dotkne země, tak se objeví nový zpětný úder. Tento úder ale už není tak výrazný. Tento efekt opakovaného úderu může nastat několikrát za sebou. Bylo zaznamenáno až čtyřicetinasobné opakování. [6, s. 171 - 173]

3.1.4.2 Účinky blesku

Podle [7, s. 18] účinky blesku mohou být tepelné, mechanické, elektrodynamické, způsobující elektrické průrazy, způsobující elektromagnetickou indukci.

Podle [7, s. 19] rozdělujeme úderu blesku podle zasaženého objektu na:



1. Přímý úder blesku do objektu bez vnější ochrany před bleskem
2. Přímý úder blesku do objektu s vnější ochranou před bleskem
3. Přímý úder blesku do nadzemního vedení nn
4. Přímý úder blesku do nadzemního vedení vn
5. Blízký úder blesku
6. Vzdálený úder blesku

AD 1

Atmosférický výboj mrak → zem, je proud záporně nabitých částic mířících z mraku do země. Pokud se v dráze tohoto proudu vyskytne nějaký objekt, tak si po jeho povrchu nebo skrz něj najde nejvodivější cestu. U budov bez vnější ochrany před bleskem není jasně definovaná nejvodivější cesta. Proud výboje prochází nejrůznějšími prvky budovy, které zahřívá. V budově vznikají potenciálové rozdíly, které mají za důsledek poškození izolace a přímo ohrožují osoby vyskytující se v objektu. Elektrodynamické síly mají za důsledek vytrhávání kabelů z držáků a někdy i vytrhávání kabelů z omítky. Při takovém úderu je enormní riziko vzniku požáru a to od

- oblouku vzniklého mezi dvěma prvky konstrukce
- místa, kde atmosférický výboj přechází do objektu
- příliš oteplených částí objektu

[7, s. 19]

AD 2

Výboj je sveden jímacím zařízením a svody do uzemňovací soustavy. Problémem je nenulový odpor uzemnění, protože v jeho důsledku se při průtoku bleskového proudu zvýší potenciál celé uzemňovací soustavy. S potenciálem uzemňovací soustavy se zvýší i potenciál ochranných vodičů a všech uzemněných kovových předmětů, konstrukcí, trubek, ... nacházejících se v objektu. Rozdíl potenciálů mezi uvažovanými uzemněnými objekty a širokým okolím může být až 1 MV. To má za následek průraz izolací a vznik velkých vyrovnávacích proudů mezi uzemněnými částmi přístrojů a napájecími vedeními přicházejícími z vnějšího prostředí. Rozdíl potenciálů určíme ze vzorce

$$\Delta U = i \cdot R_{zem}$$

kde je

i procházející proud atmosférického výboje;

R_{zem} celkový odpor uzemněné soustavy [7, s. 20].

AD 3

Při úderu blesku do nadzemního vedení se po silovém vedení začne šířit přepět'ová vlna. Vrcholová hodnota přepět'ové vlny je dána vlnovou rovnicí:

$$U_m = Z_0 \frac{I}{2}$$

kde je

U_m amplituda přepět'ové vlny



Z_0 charakteristická impedance vedení

I vrcholová hodnota proudu přenesená výbojem do vedení.

Přepět'ová vlna může být přenesena až ke koncovým uživatelům a způsobit závady citlivých elektronických zařízení [7, s. 22].

AD 4

Přímý úder blesku do nadzemního vedení vn má stejný průběh jako úder do vedení nn, ale pro koncové uživatele sítě nemá tak fatální důsledky, protože přepět'ová vlna je utlumena na distribučních transformátorech [7, s. 23].

AD 5

Při úderu blesku v blízkosti chráněné budovy působí silné galvanické, kapacitní a indukční vazby. Zdrojem galvanických vazeb je společná uzemňovací soustava, přes kterou jsou nežádoucí rozdíly potenciálu rozváděny do všech vodivě připojených kabelů. Indukční a kapacitní vazby zase umožňují přenos přepět'ových impulsů mezi oddělenými samostatnými vedeními [7, s. 24].

AD 6

Přepět'ová vlna vzdáleného úderu blesku se k postiženému objektu dostane po vedení.

3.2 Kosmické počasí a jevy s ním spojené

Podle [5, s. 224]. „Kosmické počasí je okamžitý stav okolezemního kosmického prostoru.“

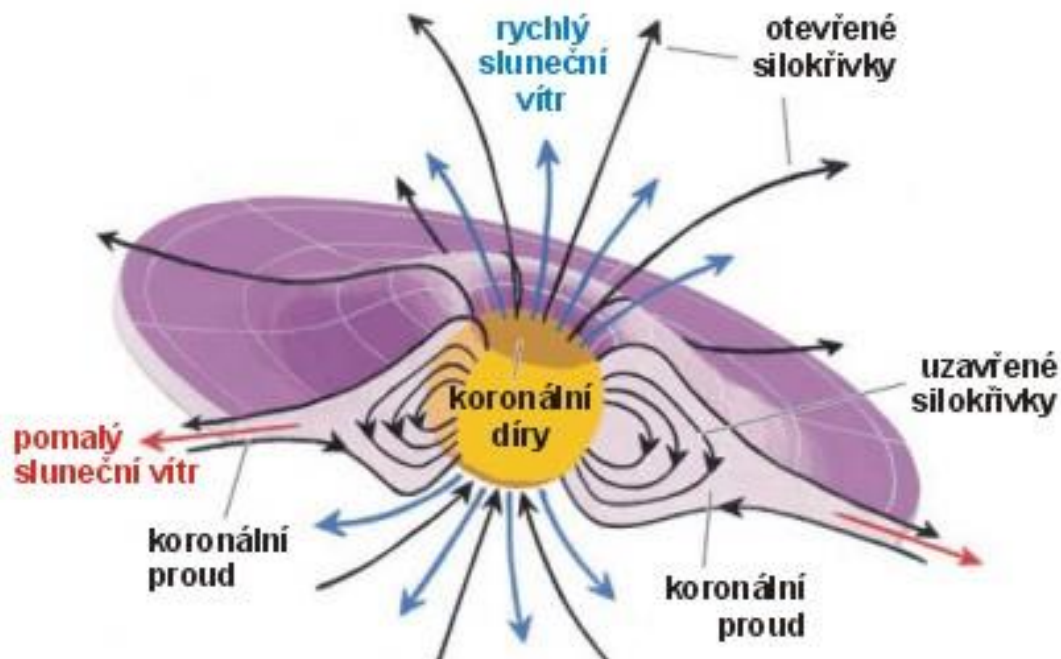
Kosmické počasí je závislé na intenzitě ultrafialového a rentgenového záření ze Slunce, slunečním větru, meziplanetárním magnetickém poli, stavu magnetosféry, ionosféry, ozonosféry a termosféry. Všechny tyto faktory jsou závislé na sluneční činnosti. Ostatní kosmické objekty ovlivňují kosmické počasí v zanedbatelné míře. Kosmické počasí má vliv například na komunikační družice (telefonní hovory, televize, internet), navigační družice (GPS), meteorologické družice, výzkumné družice (geologický výzkum, rybolov, zemědělství), rádiové vlny – snižování ionosféry (odrazná vrstva pro rádiové vlny), rozvodné sítě. Kosmické počasí je tedy nejvíce ovlivňováno činností Slunce a to především slunečním větrem. Sluneční vítr je nepřetržitý proud nabitých částic – elektronů, protonů a atomových jader (především jader helia). Rychlost slunečního větru je proměnná. Je závislá na magnetickém poli povrchu Slunce, které tyto částice urychluje. Rychlost se pak pohybuje mezi 300 – 700 km/s. Hustota částic slunečního větru v blízkosti Země je 3 – 15 částic na 1 cm^3 a jejich energie je $10^2 - 10^4 \text{ eV}$. Pro srovnání, energie částic pocházejících z mezigalaktického prostoru mohou být až 10^{20} eV . Při slunečních erupcích se hustota i rychlost částic slunečního větru zvyšuje. [5, s. 222, 224, 464] Tímto tématem se zabývá kapitola 4.

4 VLIV VÝTRYSKU KORONÁLNÍ HMOTY (CME)

4.1 Sluneční vítr

Sluneční vítr byl objeven až v roce 1951 díky úsudku Ludwiga Biermana, který pomocí slunečního větru vysvětlil již dlouho pozorované dva ohony komet. Od té doby započal výzkum slunečního větru. Na tomto výzkumu se začali podílet kosmické sondy a to například: Mariner 2, Ulysses, YOHKOH, SOHO, TRACE, RHESSI, WIND, POLAR a další [8, s. 107].

Sluneční vítr je nepřetržitý proud částic vycházejících ze Slunce skládající se z elektronů a baryonové hmoty (tj. částice z protonů a neutronů), ve které je zastoupeno 95 % protonů, 4 % jader Helia a 1 % ostatních iontů. Rychlost slunečního větru závisí na momentální aktivitě Slunce a je závislá na oblasti Slunce, odkud vyvržené částice pochází, viz Obr. 8. Pomalý sluneční vítr má rychlost 200 až 500 km/s, rychlý 600 až 900 km/s. Hustota baryonových částic před rázovou vlnou magnetického pole Země je proměnná a pohybuje se od jednotek až po několik desítek částic na cm^3 . [8, s. 108]



Obr. 8 Sluneční vítr opouštějící povrch Slunce (12 str. 106)



Jak bylo řečeno výše, tak rychlost slunečního větru závisí na sluneční aktivitě a ta je zase odvislá na slunečních cyklech. U Slunce pozorujeme čtyři sluneční cykly.

1. Hlavní cyklus s přibližnou periodou 11 let (9,5 až 12,5 let)
2. Magnetický cyklus s dvojnásobnou periodou Hlavního cyklu, tj 22 let. Během každého hlavního cyklu se na Slunci změní polarita magnetického pole (prohodí se póly) a magnetický cyklus vyjadřuje dobu, za kterou se magnetické pole dostane do původního stavu.
3. 1,3 letý cyklus objevený v roce 1994
4. 154 denní cyklus

4.1.1 Polární záře

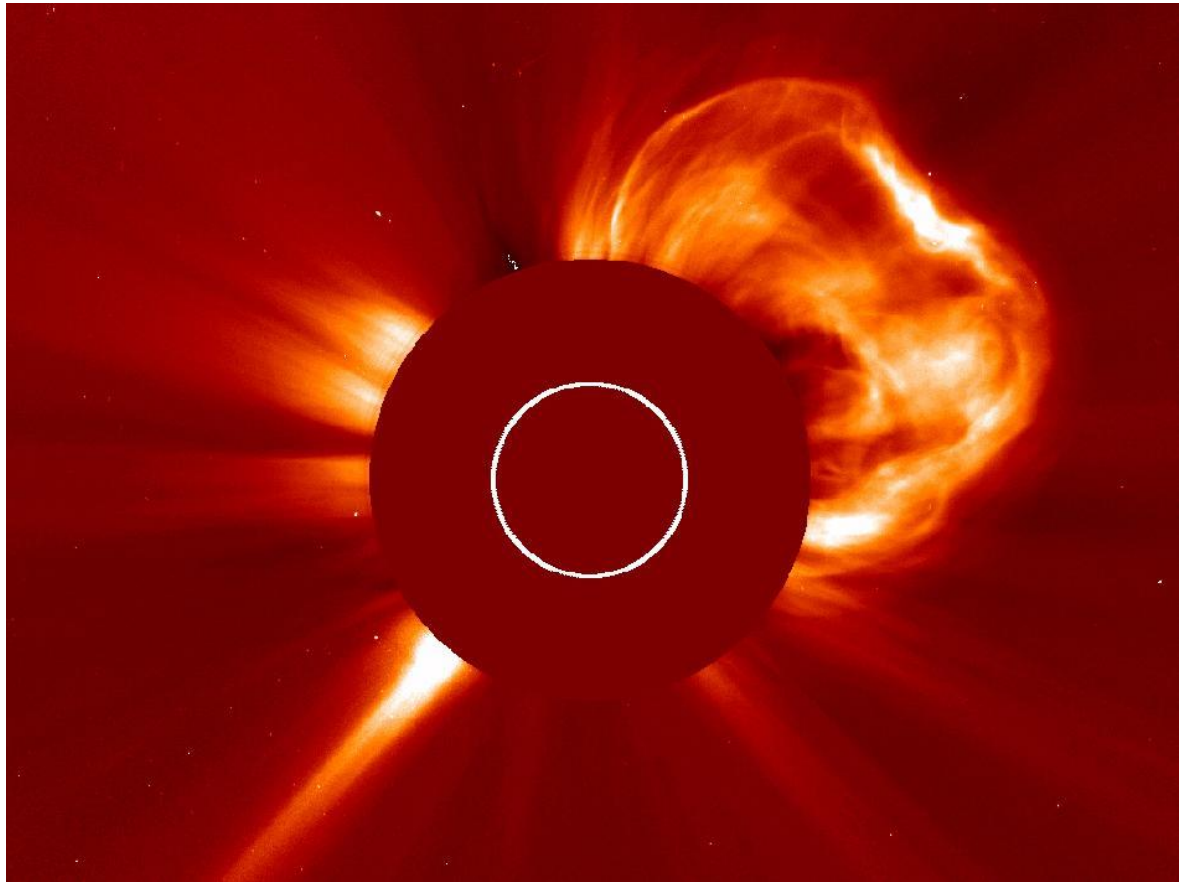
Přímým důsledkem slunečního větru je vznik polární záře. Země je proti proudu částic slunečního větru částečně chráněna magnetosférou, která od Země odklání většinu částic slunečního větru. Avšak část částic slunečního větru proniká podél siločar zemského magnetického pole v oblasti zemských magnetických pólů do vysoké atmosféry. Tam při srážkách předává svoji energii atomům a molekulám dusíku a kyslíku. Tyto atomy a molekuly pak tuto energii vyzařují v podobě světla, které pozorujeme jako polární záři [9, s. 30]. Polární záře je obvyklým jevem v polárních oblastech. V oblastech blíže rovníku se polární záře objevuje při vyšší sluneční aktivitě především během slunečních erupcí a nejvíce při výronu koronální hmoty (CME). Podle [10, s. 45] nejjízněji pozorovaná severní polární záře byla v oblasti Floridy a Jižního Texasu.

4.2 Vznik výtrysku koronální hmoty (CME)

Sluneční vítr je ze Slunce chrlen nepřetržitě, ale na Slunci dochází k událostem, které způsobí náhlé uvolnění velkého množství plazmy. Těmito událostem se říká výtrysk koronální hmoty (coronal mass ejection - CME). Plazma z CME uvolněná do meziplanetárního prostoru se označuje jako plazmoid.

Slunce je tvořeno především z jader vodíku a helia. Skládá se z jádra (vznik energie), zářivé vrstvy (v této vrstvě se energie šíří zářením) a z konvektivní vrstvy (v této vrstvě se energie šíří prouděním). Pak následuje sluneční atmosféra skládající se z fotosféry, chromosféry, koróny a heliosféry. Heliosféra je definována, jako oblast okolo Slunce vyplněná slunečním větrem. To znamená, že heliosféra sahá až k Oortovu oblaku komet. V konvektivní zóně jsou lokální siločary propletené s plazmou a vyrážejí nad povrch do sluneční atmosféry. Když se smyčky překříží, tak dochází k ohromnému uvolnění magnetické energie, které nazýváme sluneční erupce. Silné erupce mohou vyvolat výtrysk koronální hmoty (CME). Při velkých CME je vyvrženo až 50 milionů tun slunečního plazmatu. [5, s. 457] [10, s. 48]

Od Slunce k Zemi podle [5, s. 547] dorazí plazma z CME za 2 – 3 dny.



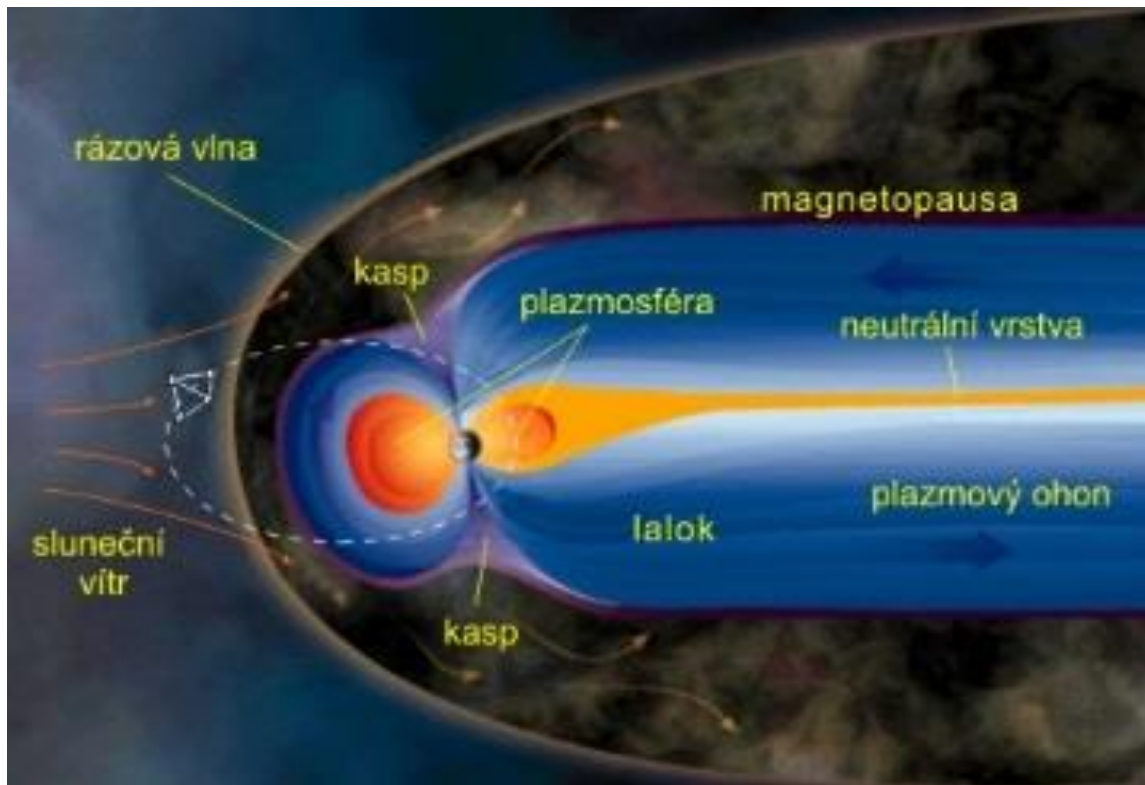
Obr. 9 CME (coronal mass ejection) – výron koronální hmoty ze Slunce [11]

4.3 Magnetické pole Země

Magnetické pole Země vytváří magnetosféru, což je oblast magnetického vlivu Země. Magnetosféra slouží, jako ochrana zemského povrchu před ničivým slunečním větrem a kosmickým zářením (částice nejasného původu o energiích až 10^{20} eV). Magnetické pole Země má přibližně dipólový charakter, avšak je deformováno slunečním větrem a meziplanetárním magnetickým polem, viz Obr. 10. Na denní straně magnetického pole Země je charakteristická rázová vlna. Většina nabitých částic slunečního větru a kosmických částic tuto rázovou vlnu obtékají, tím je chráněn zemský povrch před ničivými účinky těchto částic. Část nabitých částic se však v oblasti polárních kaspů dostává do horních vrstev atmosféry, kde vytváří plošné proudy v ionosféře, excitují atomy a tím vytváří polární záři. Noční strana magnetického pole je protáhlá do charakteristického plazmového ohonu o tloušťce několika desítek poloměrů Země a délce až několika stovek poloměrů Země. [8, s. 110]

Magnetosféra Země je zkoumána několika družicemi. Například to jsou družice CLUSTER, POLAR, WIND, a MAGION. CLUSTER je čtveřice stejných družic pohybujících se na eliptické oběžné dráze ve formaci čtyřstěnu, tak že prolétají plazmosférou, kaspem, rázovou vlnou i prostorem před rázovou vlnou. CLUSTER provádí měření parametrů slunečního větru (koncentrace a rychlost jednotlivých částic) a parametrů magnetosféry (měření magnetického pole). [8, s. 111]

Kasp je jak ukazuje Obr. 10 trychtýřovitý prostor v oblasti zemských pólů kudy do atmosféry vnikají nabitě částice ze slunečního větru a tvoří polární záři.



Obr. 10 Deformované magnetické pole Země a dráha družic CLUSTER (bílá čárkovaná elipsa) [8, s. 109]

4.4 Jak výtrysk koronální hmoty (CME) působí na zemskou magnetosféru

Plazma z CME je $1,5 \times$ rychlejší a $10 \times$ hustší než klasický sluneční vítr. Magnetosféra Země je při nárazu plazmy z CME extrémně stlačena a to z 90 000 km na 40 000 – 60 000 km. To znamená, že siločivky magnetického pole země změni pozici. Celá atmosféra je stlačena, kromě ionosféry, která je zahřátá a expanduje. Větší hustota atmosféry má vliv na družice, které jsou více brzděny. [5, s. 547]

Pro nás nejpodstatnější záležitost celého tohoto děje je fakt, že při pohybu magnetosféry působením plazmatu z CME dochází k časové změně magnetické indukce \mathbf{B} magnetického pole Země. To má, podle Maxwellovi rovnice (1), za následek vznik indukovaných elektrických polí a jím odpovídajících elektromotorických napětí (emn).

$$\varepsilon(t) = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \mathbf{n} dS \quad (1)$$

kde je

- ε indukované napětí
- S plocha indukční smyčky
- \mathbf{n} normálový vektor plochy S



- **B** magnetická indukce
- Φ_B magnetický tok

Tento děj je známý pod pojmem geomagnetická bouře. Z rovnice je patrné, že čím rychlejší je změna **B**, tím větší je indukované emn ε . Změnu magnetické indukce **B** považujeme za elektromagnetický puls. Podle [12, s. 4] trvají změny magnetické indukce **B** od 1 s do 1000 s, což odpovídá frekvencím změny magnetického pole od 1 Hz do 0,001 Hz. Jinak řečeno magnetické pole Země vlivem plazmatu z CME pomalu pulsuje s frekvencí od 1 do 0,001 Hz. To znamená, že vytvořená emn mohou trvat poměrně dlouhou dobu a také po tuto poměrně dlouhou dobu mohou téct indukované proudy. Je zřejmé, že velikost vlivu jednotlivých pulsů je závislá na rychlosti změny magnetického pole. Podle [12, s. 5] velikost působení pulsu popisujeme pomocí rychlosti změny magnetické indukce $d\mathbf{B}/dt$ v [nT/min]. Pokud se v oblasti těchto indukovaných elektrických polí nachází vodivé smyčky, tak v nich dochází ke vzniku proudů. Situace se dá připodobnit k náhlému přiblížení magnetu k vodivé smyčce.

Existuje jistá podoba působení plazmy z CME a působení jaderného výbuchu v atmosféře Země.

4.5 Puls vzniklý při výbuchu jaderné bomby

Při výbuchu jaderné bomby ve velkých výškách (nad 30 km) dochází ke vzniku elektromagnetického pulsu HEMP (high-altitude electromagnetic pulse) někdy také nazývaného NEMP (nuclear electromagnetic pulse). Při jaderném výbuchu v atmosféře opouští explozi gama záření, což je tok vysoce energetických fotonů. Tyto fotony interagují s plyny obsaženými v atmosféře. Přesněji s jejich elektrony, kterým fotony předávají část své energie tj. Comptonův jev. Fotony způsobují únik elektronů z obalu a další jejich pohyb. [7, s. 27], [13, s. 1]

Podle [13, s. 2] jsou při jaderném výbuchu vytvořeny tři hlavní skupiny pulsů lišící se od sebe dobou trvání.

- E1 – méně než 1 μ s
- E2 – od 1 μ s do 1 s
- E3 – více než 1 s

Podle [13, s. 3] jsou pro energetickou síť a prvky v ní obsažené nejvíce významné pulsy E1 a E3. E1 pulsy způsobují následující problémy:

- Selhání a zničení polovodičových součástí v elektrických rozvodnách.
- Selhání a zničení počítačů řídicích procesy v elektrárnách a rozvodnách.
- Selhání a zničení komunikačních systémů energetických zařízení.
- Proražení a zničení distribuční třídy izolátorů.

E3 pulsy způsobují následující problémy:

- Napěťový kolaps sítě vlivem přesycených transformátorů.
- Zničení HV (high voltage) a EHV (extra high voltage) transformátorů vlivem vnitřního vyhoření



Existuje velice velká podoba mezi EMP způsobeným Sluncem a E3 HEMP způsobený jaderným výbuchem a to především v jejich důsledcích na energetickou síť a její zařízení.

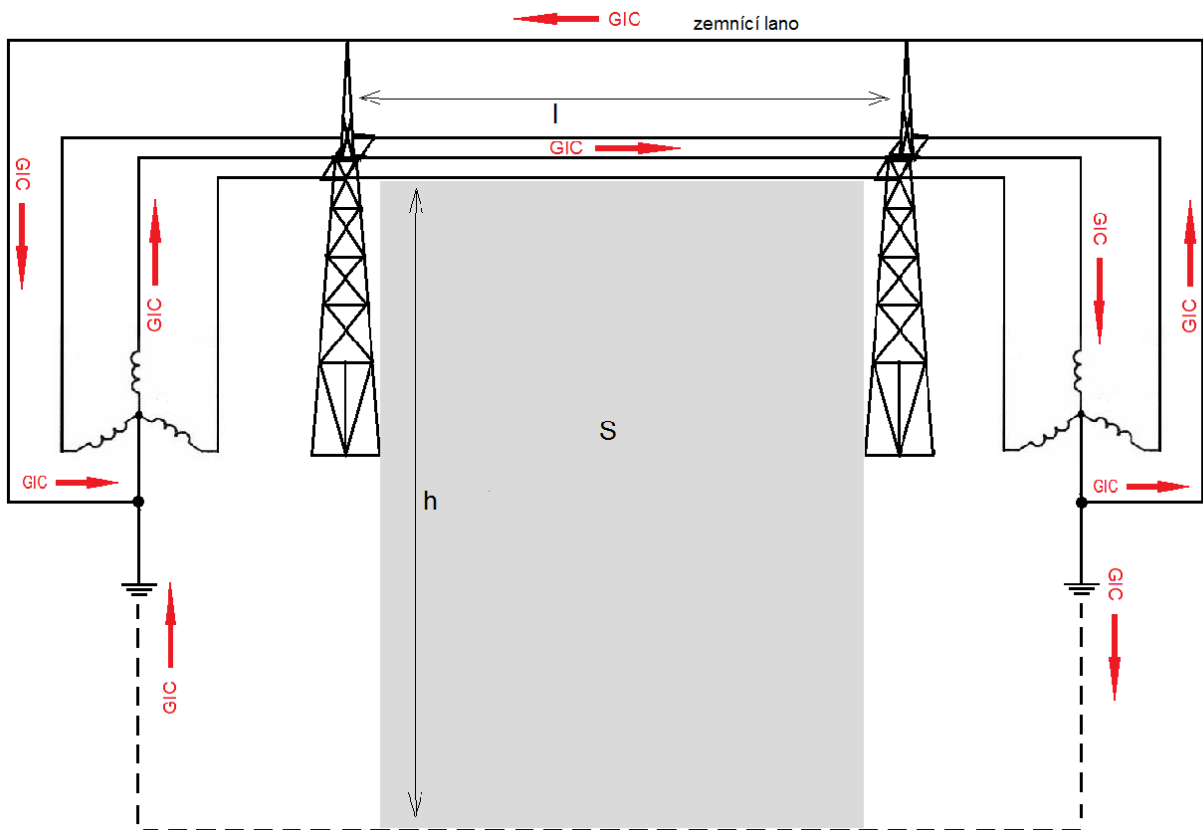
4.6 Jak vzniklý elektromagnetický puls působí na elektrickou síť

Jak bylo poznamenáno výše, tak při nárazu plazmy z CME na magnetosféru Země vznikají elektromagnetické pulsy (EMP) a tyto EMP způsobují indukovaná elektrická pole a jím odpovídající elektromotorická napětí (emn). Pokud se na zemi budou nacházet vodiče, tak se na nich bude indukovat emn a pokud konce těchto vodičů budou nějakým způsobem vodivě spojeny, tak vytvoří vodivé smyčky a v těchto vodivých smyčkách vznikne indukovaný proud. Elektrická síť na povrchu skoro všech kontinentů Země poskytuje výbornou příležitost pro indukci elektromotorického napětí. Blokované transformátory u elektráren a transformátory v rozvodnách oddělující napěťové úrovně mají uzemněné neutrální body (střed vinutí při zapojení do hvězdy). To vytváří vodivé smyčky, které jsou tvořeny vedením, uzemněním nulového bodu transformátoru a zemí. Pak při změně magnetické indukce \mathbf{B} magnetického pole Země může vedením téct indukovaný proud, který se podle [12, s. 4] označuje jako GIC (geomagnetical induced current), který v uvedeném zdroji označují za kvazi DC proud (quasi-DC current).

4.7 Vznik proudu indukovaného geomagnetickou bouří (GIC)

Z podstaty GIC můžeme odvodit některé skutečnosti. V důsledku změn magnetického pole Země vzniká v elektrické síti indukované napětí, které způsobuje vznik GIC, který okamžitě reaguje na změny dB/dt tj. sleduje pulsující magnetické pole Země. To znamená, že v závislosti na frekvenci pulsujícího magnetického pole teče GIC 1 až 1000 sekund jedním směrem a 1 až 1000 sekund druhým směrem. Právě proto se GIC označuje za kvazi stejnosměrný proud.

Elektrické sítě vvn a zvn jsou vždy realizovány jako účinně uzemněné. To znamená, že středy vinutí transformátorů (neutrální body) jsou přímo uzemněny. Celou situaci vystihuje Obr. 11, který představuje vvn nebo zvn vedení s transformátory s uzemněnými neutrálními body. Právě tyto transformátory umožňují vytvoření indukční smyčky tvořené vedením, uzemněnými transformátory a zemí. Délka vedení je označena l a plocha indukční smyčky je označena S . V obrázku je vyznačen proud GIC vzniklý při geomagnetické poruše. Podle [12, s. 5] je velikost proudu GIC v řádech 10 až 100 A, což jsou v porovnání s nominálními AC proudy tekoucími v síti za normálních podmínek malé hodnoty. Přesto tak malé DC proudy přítomné v elektrické síti dokáží způsobit značné potíže.



Obr. 11 Indukční smyčka tvořená vedením, uzemněnými neutrálními body transformátorů a zemí

4.7.1 Výpočet proudu indukovaného geomagnetickou bouří (GIC) na hypotetickém vedení

Pro výpočet proudu GIC musíme určit indukované napětí v indukční smyčce tvořené vedením, uzemněním neutrálního bodu transformátoru a zemí viz Obr. 11. Toto indukované napětí vypočteme pomocí Maxwellovi rovnice

$$\varepsilon(t) = - \int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \mathbf{n} dS \quad (2)$$

kde je

- ε indukované napětí
- S plocha indukční smyčky
- \mathbf{n} normálový vektor plochy S
- \mathbf{B} magnetická indukce

Plocha smyčky S je podle Obr. 11 rovna součinu délky vedení l a výšky vedení h . V našem modelovém příkladu uvažujeme délku vedení $l = 100$ km. Druhý rozměr indukční smyčky h je problematictější. Nejdříve jsem předpokládal, že h je přibližně výška vodičů nad zemí, což se ukázalo, jako velmi chybný předpoklad, protože pak indukované napětí vycházelo v řádech setin voltu a následný proud v řádech deseti tisícín ampéru, což se vůbec neblížilo očekávaným hodnotám okolo 10 až 100 A. Z důvodu nedostatku dostupných informací o dané problematice jsem se obrátil na autora článků, ze kterých jsem vycházel tj. zdroje [12] a [13]. Jak píše John



Kappenman ze společnosti Storm Analysis consultants tak nízkou frekvenční EMP způsobený CME zasahuje do hloubky více než 400 km, takže indukční smyčka je tvořena vedením, uzemněním neutrálních bodů transformátorů a vodivou cestou hluboko pod zemským povrchem. Jak bylo uvedeno výše, tak elektromagnetický puls způsobený CME vykazuje pomalou frekvenci změny (1 až 0,001 Hz). Tak nízká frekvence elektromagnetického pole způsobuje, že elektromagnetické pole prostoupí tak hluboko do země.

Při výpočtu předpokládáme, že vektor magnetické indukce \mathbf{B} a normálový vektor plochy \mathbf{S} jsou rovnoběžné tj. že vektor magnetické indukce \mathbf{B} je na plochu S kolmý, tím také předpokládáme, že magnetická indukce \mathbf{B} má jen jednu složku. Pak můžeme rovnici (3) upravit na tvar

$$\varepsilon(t) = - \int \frac{dB}{dt} dS \quad (3)$$

Jak je uvedeno výše, tak velikost intenzity pulsu se vyjadřuje jako rychlost změny magnetické indukce tj. dB/dt v nT/min. Podle [12, s. 5] dosáhla dB/dt při svržení energetické sítě v Hydro-Quebec v roce 1989 hodnoty 480 nT/min, což je 8 nT/s. Předpokládáme, že dB/dt je na celé ploše smyčky stejné a zajímá nás jen velikost indukovaného napětí, pak

$$\varepsilon(t) = \frac{dB}{dt} \int dS \quad (4)$$

Po integraci

$$\varepsilon(t) = \frac{dB}{dt} S \quad (5)$$

Po dosazení za S

$$\varepsilon(t) = \frac{dB}{dt} hl \quad (6)$$

Po dosazení číselných hodnot

$$\varepsilon = \frac{dB}{dt} hl = 8 \cdot 10^{-9} \cdot 400000 \cdot 100000 = 320 \text{ V} \quad (7)$$

Předpokládejme, že GIC teče přes zemnicí lano, u kterého snadno určíme jeho odpor

$$R_{zl} = \rho \frac{l}{S_{zl}} = 0,029 \cdot \frac{100000}{445} = 6,5 \Omega \quad (8)$$

kde

- $\rho = 0,029 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ je měrný odpor Al vodičů
- $S_{zl} = 445 \text{ mm}^2$ je průřez Al části vodiče AlFe
- $l = 100 \text{ km}$ je délka vedení
- R_{zl} je odpor zemnicího lana

Fázové vodiče jsou tři paralelně řazené, přičemž platí $R_{fv} = R_{zl}$



$$R_f = \frac{R_{fv}}{n} = \frac{6,5}{3} = 2,2 \Omega \quad (9)$$

kde

- R_f je odpor tří paralelně řazených fázových vodičů
- R_{fv} je odpor jednoho fázového vodiče

Pak odpor smyčky, kde teče GIC je

$$R = R_f + R_{zl} = 2,2 + 6,5 = 8,7 \Omega \quad (10)$$

Pak samotný proud GIC je

$$I_{GIC} = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{320}{8,7} = 36,8 \text{ A} \quad (11)$$

Výsledek spadá do intervalu 10 až 100 A uvedeném v [12, s. 5].

4.8 Jak proud indukovaný geomagnetickou bouří (GIC) ovlivňuje zařízení fungující v síti

Proud indukovaný v elektrické síti při geomagnetické poruše GIC působí na mnohá elektrická zařízení v síti. A to buď primárně anebo sekundárně prostřednictvím jiných zařízení. Jak bylo uvedeno výše, tak GIC je kvazi DC proud a uvažujeme-li ho v časových okamžicích 1 až 1000 s (podle frekvence geomagnetické poruchy), tak můžeme uvažovat DC proud. Tento DC proud se nasuperponuje na AC proud elektrické sítě. Takže v elektrické síti máme AC proud, který teče sítí za normálních podmínek, ale s výraznou stejnosměrnou složkou, za kterou je zodpovědný naindukovaný GIC.

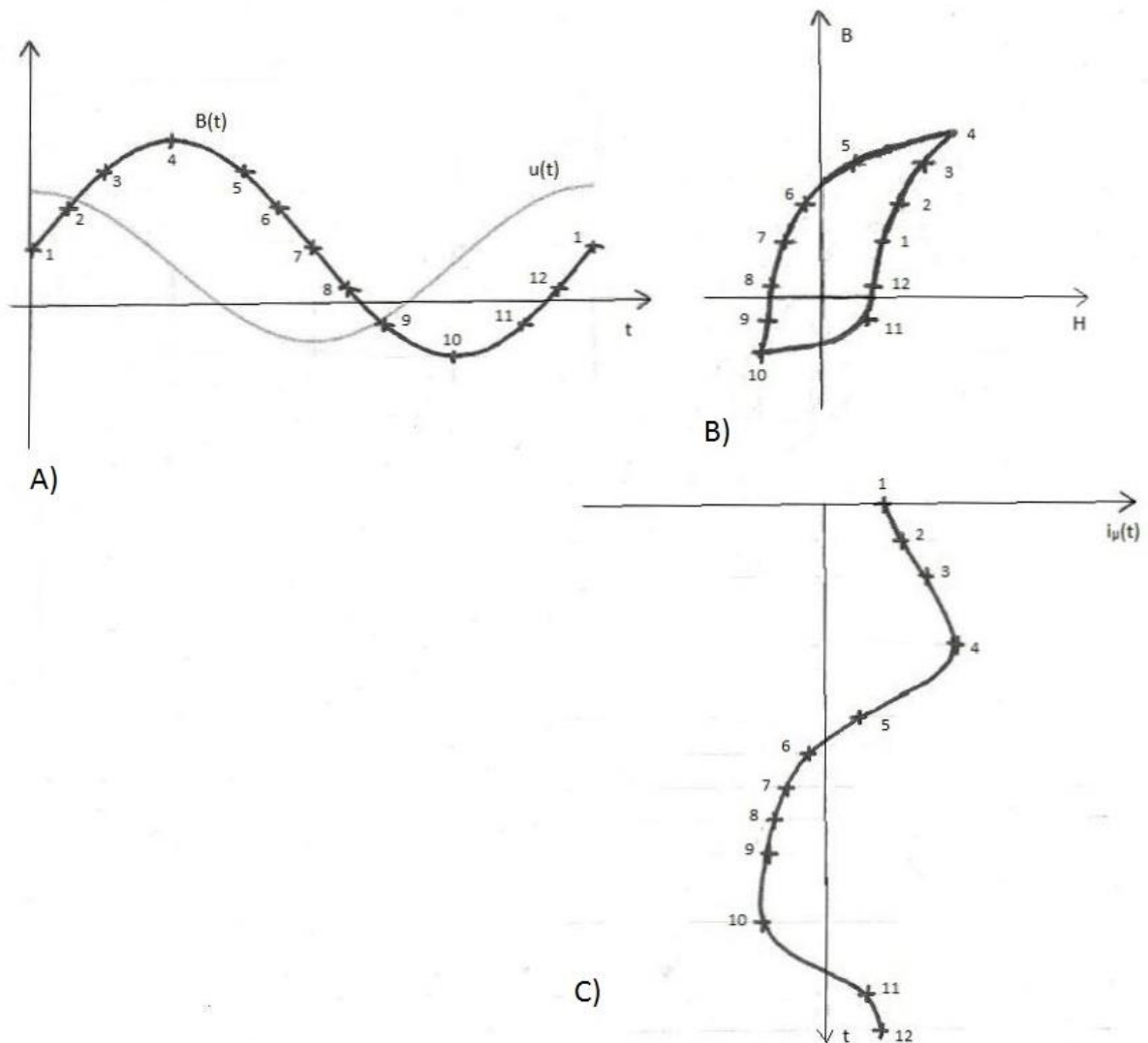
GIC naindukovaný v elektrické síti způsobuje přesycení blokových transformátorů a transformátorů přítomných v rozvodnách. Přesycené transformátory odebírají ze sítě větší a vyššími harmonickými deformovaný proud. Větší proud tekoucí do vinutí transformátoru má za následek jeho zvýšené oteplení, které může vést až k jeho vyhoření. Zvýšený proud odebíraný přesycenými transformátory způsobuje větší úbytky napětí, což vede k napěťové nestabilitě v síti. Tuto nestabilitu se pokoušejí vyrovnávat například statické Var kompenzátory (SVC), ale proud deformovaný vyššími harmonickými způsobuje chybnou funkci ochrany těchto kompenzátorů a tyto ochrany kompenzátor odpojují od sítě. Tím se ještě více projevují napěťové nestability a celá elektrická síť může zkolabovat a dojde k blackoutu (napěťové zhroutilí sítě). [12]

4.8.1 Vliv geomagnetické bouře na transformátory

Jak je uvedeno v [12, s. 4], tak GIC velice výrazně ovlivňuje provoz transformátorů. Ovlivnění provozu transformátorů se dá považovat za nejvýznamnější primární efekt GIC. Základ problému je v tom, že díky naindukované stejnosměrné složce napětí nasuperponované na síťové napětí vzroste magnetická indukce v jádře transformátoru do oblasti kolene magnetizační křivky, to ukazuje Obr. 12. Princip vzniku zkrusleného proudu v transformátoru je uveden v [14, s. 317]. Pokud magnetická indukce v jádře transformátoru roste až k hodnotám, kde se nalézá koleno magnetizační křivky daného materiálu jádra, tak se jádro transformátoru přesycuje. Obr. 12



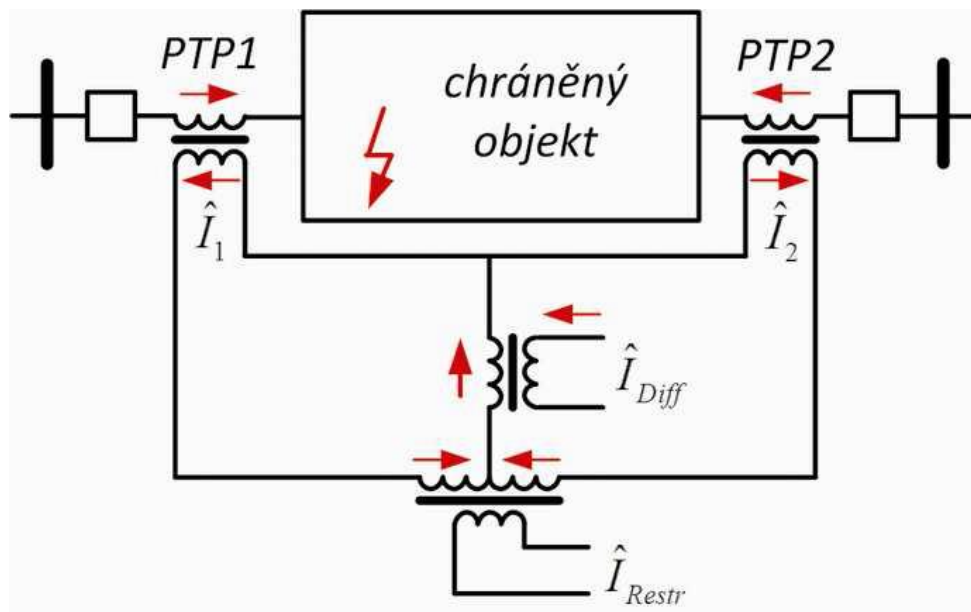
ukazuje grafickou metodu určení odebíraného proudu transformátoru. Jak ukazuje Obr. 12, tak přesycený transformátor odebírá silně deformovaný proud obsahující mnoho vyšších harmonických. Tento silně deformovaný proud pak v síti způsobuje další problémy. Hysterezní ztráty i ztráty vířivými proudy jsou frekvenčně závislé. Deformovaný proud obsahuje mnoho vysokofrekvenčních vyšších harmonických, proto rostou ztráty vířivými proudy i hysterezní ztráty. V důsledku toho odebírá transformátor vyšší proud na pokrytí těchto ztrát, tím se jeho vinutí více zahřívá a může dojít až k jeho vyhoření a zároveň vyšší proud zvyšuje úbytky napětí na vedení, což vede k napěťovým kolapsům. Napěťovým kolapsům by měli bránit SVC (Var kompenzátory, ale ochrany chránící tyto kompenzátory jsou citlivé na deformovaný proud. V důsledku přítomnosti deformovaného proudu (deformovaný proud odebíraný přesycenými transformátory) tyto ochrany chybně reagují a odpojují kompenzátory od sítě.



Obr. 12 A) Síťové napětí posunuté přítomností naindukované ss složky a jemu odpovídající magnetická indukce v jádře transformátoru. B) Hysterezní smyčka materiálu jádra transformátoru. C) Deformovaný proud odebíraný přesyceným transformátorem.

4.8.2 Rozdílová ochrana, funkce a její citlivost na vyšší harmonické

Ochrana určená pouze k chránění určitého elektrického zařízení v elektrické síti, která je nečinná vůči poruchám mimo chráněné elektrické zařízení se nazývá rozdílová ochrana. Její principiální zapojení je ukázáno na Obr. 13. Rozdílová ochrana vyhodnocuje rozdílový proud, který vzniká jen v případě vzniku svodového proudu (zkratu) uvnitř chráněného objektu. Ke vznik rozdílového proudu může dojít i v případě, že nedošlo ke zkratu uvnitř chráněného objektu a to v případě vnějšího zkratu, kdy přes měřící transformátory proudu (PTP) teče velký proud a jejich měření je pak zatíženo velkou chybou. Z toho důvodu je v obvodu sledován ještě stabilizační proud, který v případě vnějšího zkratu rozdílovou ochranu znečitliví.



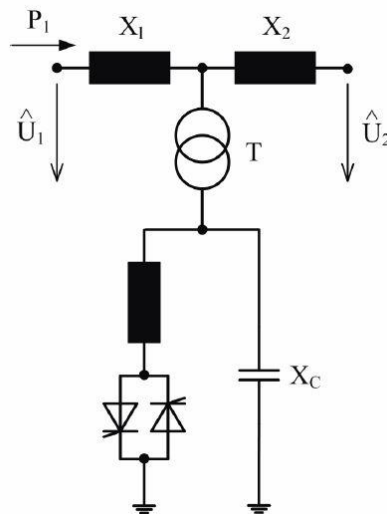
Obr. 13 Rozdílová ochrana - principiální zapojení [15]

Vyšší harmonické proudy přítomného v rozvodné síti mimo jiné (poruchy funkce elektronických zařízení, nepříznivé ovlivnění zhášení oblouků při zemním spojení, nesprávná funkce přijímačů HDO, zkrácení životnosti elektrických zařízení) způsobují chybnou funkci ochran. To může způsobit odpojení důležitých elektrických zařízení od zbytku sítě. [16, s. 38]

Chybná funkce rozdílové ochrany je pravděpodobně způsobena opět přesycením měřících transformátorů proudu (PTP).

4.8.3 SVC (Statický Var kompenzátor)

Jak píše John Kappenman ve svém emailu ze dne 2. 4. 2014, tak při blackoutu v Quebecu způsobeném geomagnetickou bouří v roce 1989 byly v důsledku chybné funkce ochran odpojeny statické VAR kompenzátory. Statický Var kompenzátor se skládá z pevných kondenzátorů, tyristorově spínaných kondenzátorů, tyristorově spínaných tlumivek a tyristorově řízených tlumivek. Tyto komponenty jsou paralelně připojeny k elektrické síti. [17, s. 43]



Obr. 14 SVC (Var kompenzátor) [17, s. 44]

Funkce SVC podle [17, s. 44]:

- dynamická stabilizace napětí (zvýšení přenosové schopnosti, omezení kolísání napětí)
- zlepšení stability systému (zvýšení dynamické stability, zlepšené tlumení při kývání)
- vyrovnávání dynamického zatížení
- podpora napětí v ustáleném stavu

SVC se používá ve významných centrech spotřeby, kde zabraňuje napěťovým kolapsům v době špičky spotřeby, v kritických uzlech napájecích soustav a v napájecích bodech velkých průmyslových závodů. [17, s. 44]

4.9 Blackout způsobený výtryskem koronální hmoty (CME)

Podle [13, s. 2] ze statistických dat a uvážení 11 letého cyklu Slunce můžeme očekávat CME s fatálními důsledky pro elektrickou síť jednou za 30 let. Avšak vzhledem k podstatě CME se blackout týká celých kontinentů a v případě zničení transformátorů se obnovení dodávky EE může protáhnout až na několik měsíců. Tím se blackout způsobený CME liší od blackoutů způsobených jinými přírodními jevy, které jsou vždy spíše lokálního charakteru. Geomagnetické bouře, které v budoucnosti vlivem CME mohou nastat, mohou dosahovat hodnot rychlosti změny geomagnetického pole až $\text{dB}/\text{dt} = 5000 \text{ nT}/\text{min}$, což je přibližně desetkrát víc než při události v Quebecu.

4.10 Historie výskytu výpadků proudu v důsledku Sluneční aktivity

Je známo několik událostí v historii, které dokládají vliv Slunečních erupcí na prvky rozvodných sítí. V [10, s. 45] je uvedeno následující:

1. 1859 – Carringtonova událost
2. 1972 – výbuch trafostanice v Britské Kolumbii
3. 1989 – kolaps sítě v Kanadském Quebecu



4. 2003 – výpadek proudu ve Švédsku

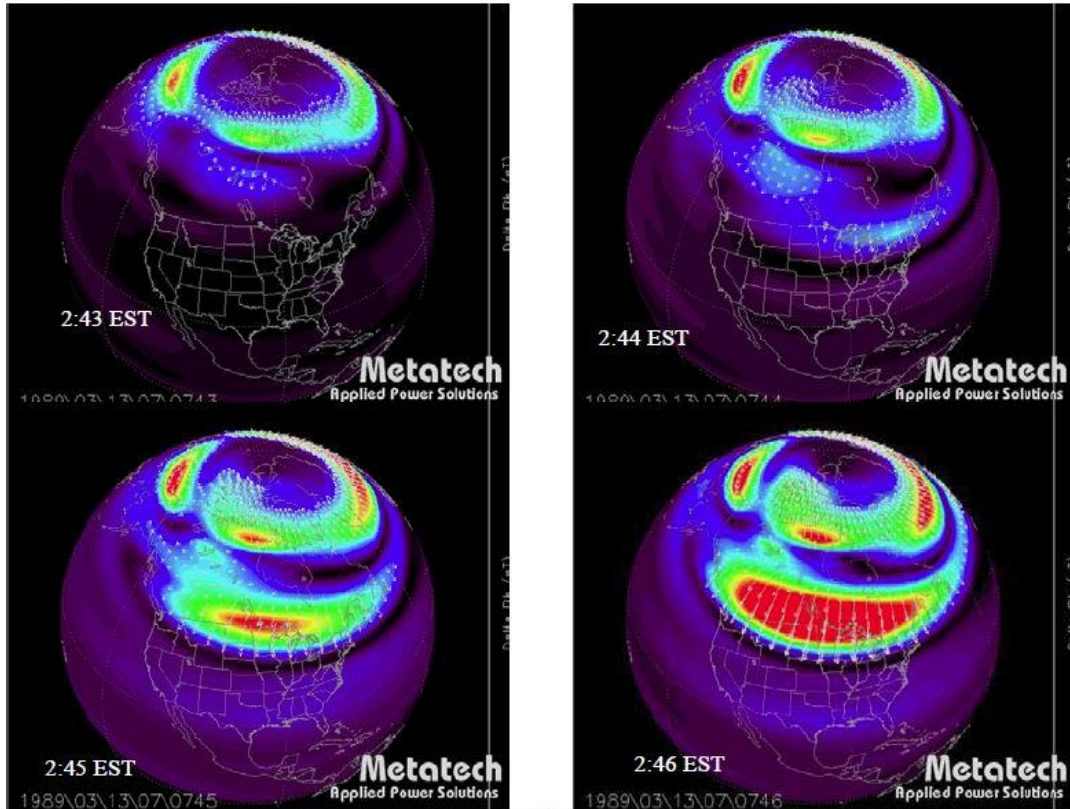
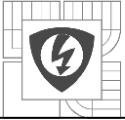
V [12, s. 5] je uvedeno, že k větším vlivům na elektrická zařízení došlo v USA při slunečních bouřích v letech 1957, 1958, 1968, 1970, 1972, 1974, 1979, 1982, 1983, 1989 a 1991.

4.10.1 Popis událostí v Quebecu

13. až 14. března roku 1989 byla část severní polokoule vystavena silné geomagnetické bouři vyvolané CME. Elektromagnetický puls vyvolaný touto bouří vyřadil z provozu soustavu energetických zařízení Hydro-Quebec v provincii Quebec v Kanadě. [12, s. 5]

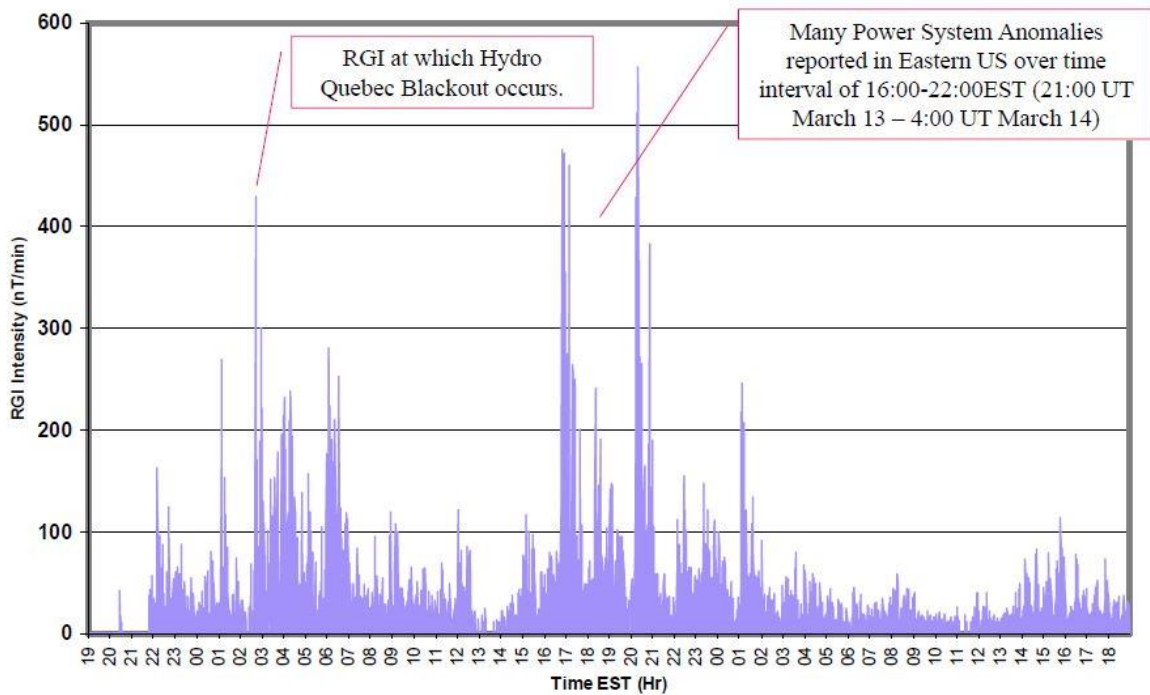
Stlačení magnetosféry plazmatem z CME vyvolalo elektromagnetický puls (změna indukce \mathbf{B}). V důsledku indukovaného napětí začal ve smyčkách tvořených vedením, uzemněnými uzly transformátorů a zemí téct proud nazývaný GIC (geomagnetical induced current). Podle Kappenman [12, s. 5] v reakci na GIC začala ochabovat napěťová úroveň sítě, proto se spustili automatické napěťové regulátory, což byly, jak píše John Kappenman ve svém emailu ze dne 2. 4. 2014 statické Var kompenzátory (SVC), které napěťovou nestabilitu začali vyrovnávat. Avšak příslušné ochrany chránící VAR kompenzátory chybně zareagovali v důsledku proudu zkresleného vyššími harmonickými a tyto kompenzátory (celkem 7) ochrany odpojily od zbytku sítě. Za tento deformovaný proud byly odpovědné přesycené transformátory. Jakmile byly kompenzátory odpojeny od sítě, tak síť do několika sekund zkolabovala a nechala 6 miliónů obyvatel bez elektrického proudu. Od bezproblémového provozu sítě po kompletní provinční blackout uběhlo pouze 90 sekund. Rychlost změny magnetické indukce ($d\mathbf{B}/dt$) v úrovni zemského povrchu během geomagnetické bouře v Severní Americe ukazuje Obr. 15. Puls, který způsobil kolaps Hydro-Quebec, měl $d\mathbf{B}/dt = 480$ nT/min. Většina významných pulsů během této geomagnetické bouře měla hodnotu $d\mathbf{B}/dt$ o velikosti 300 nT/min až 600 nT/min. Pro označení rychlosti změny magnetické indukce $d\mathbf{B}/dt$ se také používá RGI (regional GIC index). Přehled zaznamenaných pulsů vyjádřených v RGI ukazuje Obr. 16. [12]

V následujících 24 hodinách dalších 5 magnetických pulsů vytvořených přes severoamerický kontinent téměř svrhly energetický systém od středozápadu po středovýchod kontinentu. Na Obr. 17 jsou vyznačeny velikosti RGI v postižených oblastech při jednom z pěti následujících pulsů. Obr. 18 ukazuje místo a druh problému při tomto pulsu. [12]

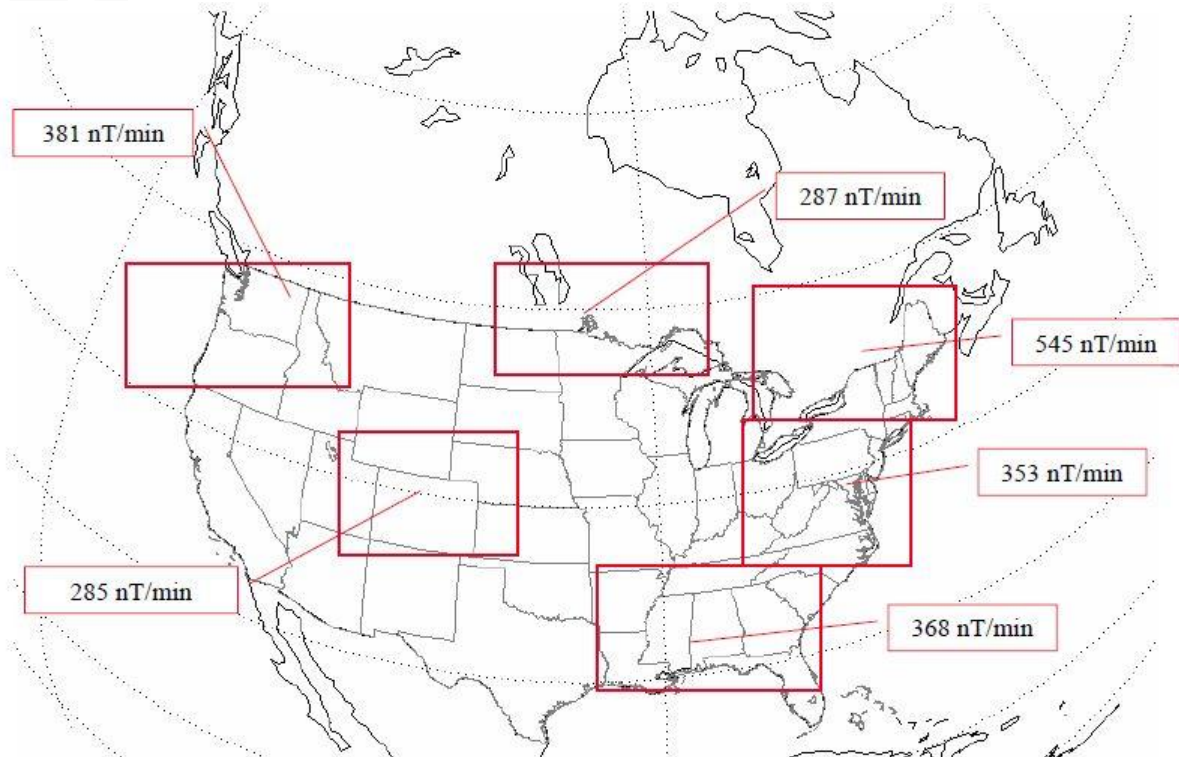


Obr. 15 Rychlost změny magnetické indukce, záznamy v časech 2:43 až 2:46 EST, týká se pulsu, který způsobil kolaps Hydro-Quebecu [12]

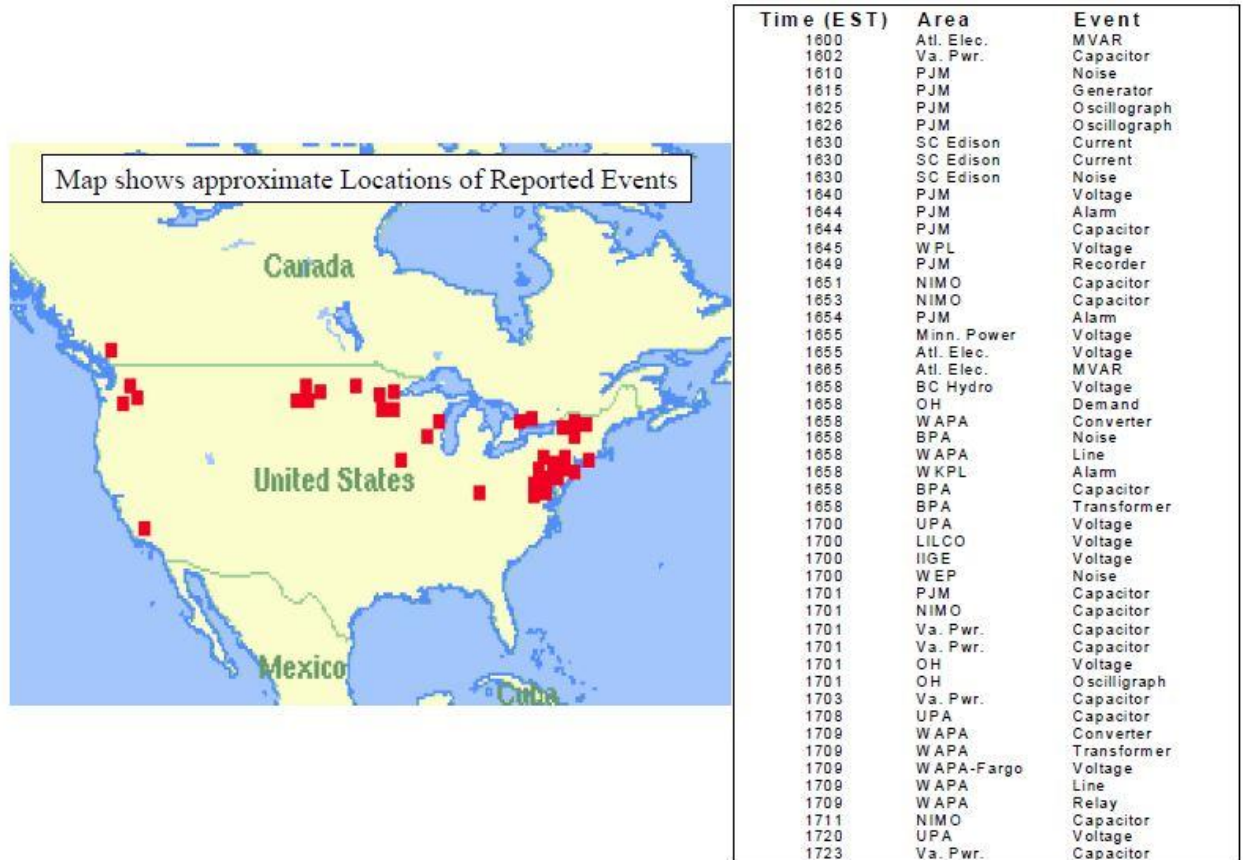
NY/NE/Canada RGI - March 13-14, 1989



Obr. 16 Změřený RGI v oblasti New Yorku, New Englandu a Quebecu 13. až 14. března 1989 [12]



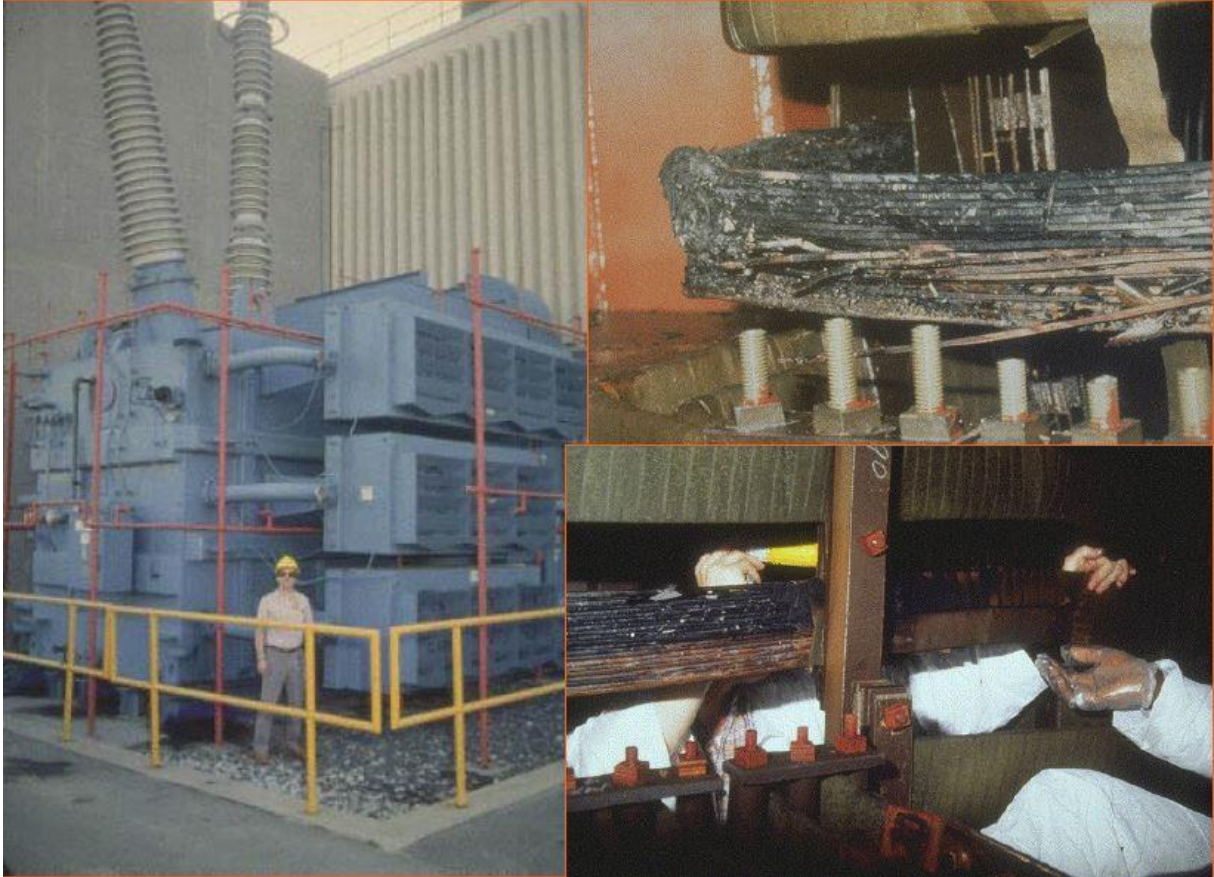
Obr. 17 Velikosti RGI v postižených oblastech při jednom z pěti pulzů během geomagnetické bouře 1989 [12]



Obr. 18 Výčet a místo poruch při jednom z pěti pulzů během geomagnetické bouře 1989 [12]



Během celé geomagnetické bouře došlo k několika případům vnitřního vyhoření transformátorů, kdy došlo k roztavení vinutí a shoření jeho izolace. V jednom případě v jaderné elektrárně Salem v New Jersey došlo ke kompletnímu zničení 1200 MVA transformátoru. Elektrárna byla odstavena po dobu 40 dní, do doby než byl dovezen jiný transformátor ze zrušené jaderné elektrárny ve státě Washington. [12]



Obr. 19 Vyhořelý transformátor v jaderné elektrárně Salem [12]

5 MOŽNOSTI SNÍŽENÍ VLIVŮ

Možnosti snížení přírodních jevů řešených v kapitolách 2 a 3 jsou řešeny v normách a nebudou předmětem této kapitoly.

5.1 Možnosti snížení vlivu výtrysku koronální hmoty (CME) na elektrickou síť

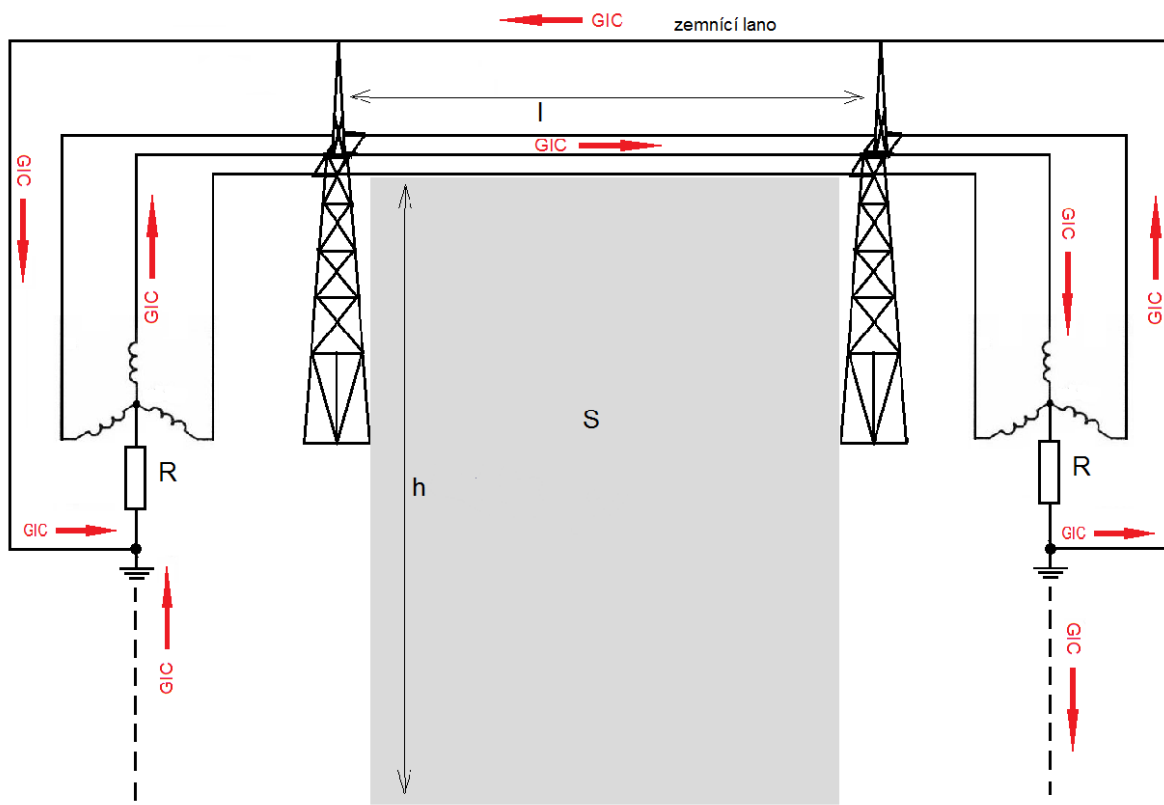
Podle [13, s. 3] lze dosáhnout snížení vlivu CME na elektrickou síť dvěma způsoby:

1. Technická opatření vedoucí především ke snížení GIC
2. Provozní postupy při hrozící geomagnetické bouři

Výhodou je, že tato opatření jsou na sobě nezávislá. To znamená, že selhání jedné části opatření neovlivňuje druhou část opatření.

5.1.1 Technická opatření vedoucí ke snížení proudu indukovaného geomagnetickou bouří (GIC)

Vzhledem k tomu, že problémy v elektrické síti při geomagnetické bouři způsobené CME jsou způsobeny především GIC, tak je dobré zaměřit pozornost k omezení tohoto proudu. Vodivá smyčka, ve které teče indukovaný GIC je tvořena díky uzemněnému neutrálnímu bodu transformátoru. To je místo v elektrické síti kam je třeba zaměřit pozornost při snaze omezit GIC.



Obr. 20 Zařazení odporů mezi neutrální bod transformátorů a zemnicí soustavu za účelem snížení GIC



Řešení tkví v pasivních zařízeních omezujících GIC. Zařízení omezující nebo blokující GIC jsou vyvíjena od roku 1990. Jedná se především o zemnicí rezistory, které jsou instalovány mezi neutrální bod transformátoru a zemnicí soustavu. Tyto rezistory mohou mít relativně nízký odpor (5Ω). I tak malý odpor může mít za následek značné snížení GIC (až o 60 %) [13, s. 5].

Pokud se vrátíme k výpočtu GIC ve čtvrté kapitole a přidáme do obvodu dva rezistory o odporu $R_R = 5 \Omega$, každý k jednomu transformátoru, tak získáme proud GIC o velikosti

$$I_{GIC} = \frac{\varepsilon}{R + 2R_R} = \frac{320}{8,7 + 2 \cdot 5} = 17,1 \text{ A} \quad (12)$$

Původní hodnota GIC byla 36,8 A. To je 46 % původní hodnoty

$$x = \frac{17,1}{36,8} \cdot 100 = 46 \% \quad (13)$$

EMP commission (komise vytvořená za účelem analýzy rizik od CME a HEMP) ve své zprávě uvádí, že odhadovaná cena vypínacích zemnicích rezistorů pro vysokonapěťové transformátory je v rozsahu 150 milionů amerických dolarů. Odhadovaný počet transformátorů v sítích 230 kV, 345 kV, 500 kV a 765 kV je 5000 kusů. Program navržený na ochranu elektrické sítě před účinky CME a HEMP na území USA počítá s částkou 1 miliardy amerických dolarů, což je stále méně než cena rozsáhlého výpadku americké ekonomiky v důsledku rozsáhlých blackoutů. [13, s. 5]

5.1.2 Provozní postupy při hrozící geomagnetické bouři

Vzhledem k podstatě blackoutů způsobených CME je velice důležité přijmout speciální provozní postupy v případě hrozící geomagnetické bouře nebo v případě již probíhající geomagnetické bouře. Podle [13, s. 6] operátoři řídicí prvky elektrické sítě musí být vycvičeni k tomu, aby

- rozpoznali širokou škálu působení EMP a poznali, že se může jednat o geomagnetickou bouři (operátoři v kanadském Hydro-Quebec do poslední chvíle netušili, že potíže v síti, které pozorují, jsou způsobeny geomagnetickou bouří) nebo o útok elektromagnetickou bombou
- přijmuli okamžitá opatření, která zabrání dalšímu poškození elektrické sítě, rozpoznali zdroje problému a započali efektivně obnovovat funkčnost sítě
- udrželi kritické funkce sítě, zatímco jsou zasažené prvky sítě obnovovány

[13, s. 6].

Některé provozní postupy, které mohou snížit rozsah zasažení elektrické sítě, snížit počet zasažených zařízení a snížit jejich poškození podle [13, s. 6]:

- Zvážit možnost odpojení některých nákladných zařízení od zbytku sítě a uchránit je tak od efektů zničujících úrovní GIC.
- Zvážit možnost odpojení klíčových blokových transformátorů a zabránit tak jejich totálnímu zničení vlivem GIC.
- Zvážit možnost zredukovat nebo odpojit části elektrických sítí, aby bylo zabráněno zničení klíčových a nákladných zařízení v elektrické síti.



- Zvážit možnost navýšení počtu pracovníků operačních středisek v případě hrozící geomagnetické bouře, aby při těchto výjimečných situacích bylo upřednostněno manuální ovládání prvků sítě.

Může to znít podivně, ale při blížící se geomagnetické bouři může být účelné vytvoření menších a méně nebezpečných záměrných blackoutů, aby klíčové prvky v síti byly ochráněny od efektů GIC.

5.1.3 Předpovědi hrozících geomagnetických bouří

Pokud mají být účinné speciální postupy operátorů při hrozící geomagnetické bouři, tak musí existovat spolehlivá předpověď kosmického počasí. To znamená v reálném čase sledovat pochody na Slunci a včas odhalit blížící se CME.

V roce 1998 byl ve Velké Británii zprovozněn první systém na předpověď geomagnetických bouří. Tento systém používá data o slunečním větru získané ze satelitu ACE L1. [13, s. 6]

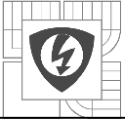
V současné době je ve vesmíru množství moderních satelitů sledujících děje na Slunci a sledující zemskou magnetosféru. Jedním z těchto projektů je mise STEREO používající dvojici satelitů.

5.1.3.1 Observatoře zkoumající Slunce

„Dvojice observatoří STEREO byla vypuštěna z Cape Canaveral Air Force Station na Floridě 25. října 2006 pomocí rakety Delta II. Mise STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory) je prvním projektem využívajícím třírozměrné zobrazení Slunce, slunečního větru a kosmického počasí. Cílem projektu je, díky znalosti prostorového rozložení pozorovaných dějů, lépe poznat vliv sluneční činnosti na děje probíhající na Zemi. Mise byla naplánována na dva roky a stále probíhá. Observatoře letí na dráze velmi podobné dráze Země okolo Slunce a ve stejném směru. STEREO A je umístěna na nižší a rychlejší dráze před Zemí a STEREO B je oproti ní v téměř stejné vzdálenosti na vyšší a tedy pomalejší dráze za Zemí. Vzdálenost od Země a také mezi oběma observatořemi se proto neustále zvětšuje.“ [18]

Každý satelit v misi STEREO je vybaven množstvím přístrojů. Základem jejich vybavení jsou koronografy pracující v oblasti viditelného světla. Koronografy mají rozdělenou sféru pozorování. Analyzují oblast od 1,4 násobku poloměru Slunce (R_S) po patnáctinásobek poloměru Slunce. Dalším přístrojem je EUVI, který pracuje v UV oblasti a jeho úkolem je sledování fotosférických magnetických polí, pozorování chromosféry a vnitřní koróny. Pro případnou předpověď kosmického počasí ovlivňujícího Zemi, je nejvýznamnější přístroj Heliospheric Imager (HI) pracující v prostorovém úhlu $12 - 318 R_S$, jehož úkolem je sledování plazmoidů mezi Sluncem a Zemí uvolněných během CME. [18]

Satelity mise STEREO zaznamenaly vznik eruptivních smyček, ale přesný mechanismus jejich vzniku stále nebyl odhalen. Vlastnosti plazmoidů vzniklých při CME zkoumaly satelity STEREO při interakci těchto plazmoidů s magnetosférami planet nebo s ohony komet. [18]



6 ZÁVĚR

V této práci byly přehledově shrnuty přírodní jevy ovlivňující činnost elektrických zařízení. Podrobněji byla probána problematika atmosférického náboje, bouřky a blesku, kde byly ukázány mechanismy vzniku bouřky a následné bleskové aktivity. Byly probány různé typy úderů blesků.

Hlavní důraz v této práci byl kladen na problematiku výtrysků koronální hmoty ze Slunce (CME) a jeho následná interakce s magnetosférou Země. Byl popsán příčině-následkový řetězec událostí, který vystihuje, že pro elektrická zařízení v elektrické síti je nejvýznamnějším dějem naindukování napětí ve smyčce tvořené vedením, uzemněním neutrálního bodu transformátoru a vodivou cestou zemí. Toto naindukované napětí pak vytvoří stejnosměrný proud tekoucí ve vedení označovaný jako GIC (geomagnetical induced current), který způsobuje přesycování transformátorů. Přesycené transformátory odebírají vyšší proud, který způsobuje vyšší úbytky napětí na vedení a více zahřívá vinutí, které se může roztavit a může shořet jeho izolace, tak dojde ke zničení transformátoru. Proud odebíraný přesycenými transformátory je deformovaný vyššími harmonickými. Takto deformovaný proud způsobuje chybnou funkci ochran, které reagují, i když by neměly a odpojují například Var kompenzátory (SVC), které pak nemohou stabilizovat napětí v síti. Souhrou všech těchto vlivů nakonec může dojít k rozsáhlým blackoutům.

Na hypotetickém vedení byl proveden přibližný výpočet proudu GIC. Výsledek výpočtu spadá do rozmezí velikostí proudů GIC uvedeném v literatuře. Spolehlivé a ucelené informace k této problematice nejsou k dispozici, proto některé údaje týkající se mechanismu vzniku indukovaného napětí a následného proudu GIC musely být konzultovány se specialisty z USA.

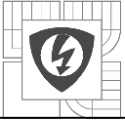
V další části byly popsány události z roku 1989 v kanadské oblasti Quebec, kde byla energetická síť Hydro-Quebec ochromena silnou geomagnetickou bouří.

V poslední části byly formulovány možnosti, jak omezit působení CME na elektrickou síť pomocí rezistorů zařazených na uzemnění nulových bodů transformátorů a pomocí speciálních operačních postupů v případě hrozícího ohrožení.



LITERATURA

1. ČSN.EN.60721-2-2. *Klasifikace podmínek prostředí - Podmínky vyskytující se v přírodě - Srážky a vítr*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
2. ČSN EN 33 2000-5-51, E. 3. *Elektrické instalace nn - část 5-51: Výběr a stavba elektrického zařízení - Všeobecné předpisy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
3. ORSÁGOVÁ, J. *Rozvodná zařízení - skriptá VUT v Brně*.
4. pocasi.chmi.cz. *Popis atmosférických jevů a jejich intenzity* [online]. 7. únor. 2008 [cit. 2013-listopad-20]. Dostupné z: http://pocasi.chmi.cz/meteo/olm/Let_met/_tmp/popis.htm
5. KLECZEK, J. *Velká encyklopedie vesmíru..* Praha: Academia, 2002, 582 s.. ISBN 80-200-0906-x.
6. FEYNMAN, R. P. R. B. LEIGHTON a M. SANDS. *Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady..* Havlíčkův Brod: Fragment, 2001, 806 s.. ISBN 80-7200-420-4.
7. BURANT, J. *Blesk a přepětí: systémová řešení ochran*. Praha: FCC Public, 2006, 252 s s.. ISBN 80-86534-10-3.
8. KULHÁNEK, P. *Astronomie a fyzika na přelomu tisíciletí II*. Valašské Meziříčí: Aldebaran, 2005. ISBN 80-903117-7-6.
9. RÜKL, A. *Pohledy do vesmíru*. 2. aktualizované vydání. Praha: Aventinum, 2005. ISBN 80-86858-14-6.
10. *National Geographic*. Česko. Praha: 2012, č červen, 38-53 s..
11. SOHO View of CME Following X1.8 Solar Flare on 01.27.2012. *nasa.gov* [online]. 27. 1. 2012 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: http://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/20120127-cme.html
12. KAPPENMAN, J. G. Web solarstormconsultant. In: *The Vulnerability of the US Electric Power Grid to Space Weather and the Role of Space Weather ...* [online]. 27. říjen. 2003 [cit. 2013-říjen-25]. Dostupné z: http://solarstormconsultant.com/wp-content/uploads/2012/01/Kappenman_2003_Testimony.pdf
13. RADASKY, W. a J. KAPPENMAN. [online]. 21. červenec. 2009 [cit. 2013-říjen-25]. Dostupné z: http://solarstormconsultant.com/wp-content/uploads/2012/01/Kappenman_2009_Testimony.pdf
14. PATOČKA, M. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoprůdné elektrotechnice*. Brno: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.



15. ORSÁGOVÁ, J. *Rozvodná zařízení část 2 - skripta VUT v Brně*. Brno.
16. TLUSTÝ, J. *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí*.. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 253 s.. ISBN 978-80-01-04939-6.
17. TLUSTÝ, J. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 255 s.. ISBN 978-80-01-04940-2.
18. HAVLÍČEK, I. Mise STEREO – prostorové sledování kosmického počasí. In: *aldebaran* [online]. 29. 8. 2008 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_36_ste.php