

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky

## Geomagnetické indukované proudy v rozvodné síti České republiky

**Anna Smičková**

Vedoucí práce: doc. Mgr. Michal Švanda, Ph.D.

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Květen 2019



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Smičková** Jméno: **Anna** Osobní číslo: **459229**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Geomagnetické indukované proudy v rozvodné síti České republiky**

Název bakalářské práce anglicky:

**Geomagnetically induced currents in the Czech power grid**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je poprvé v českých podmínkách vyšetřit amplitudu geomagneticky indukovaných proudů (GIC) v rozvodné síti. Obecně se soudí, že tyto indukované proudy vedou k zvýšené poruchovosti klíčových komponent rozvodné sítě a jejich efekty jsou dobře prokázány v zemích ležících blíže magnetickým pólům (Skandinávie, USA, Kanada, jižní Afrika apod.), kde amplitudy GIC dosahují v bouřlivých obdobích hodnot až stovek ampér. V podmínkách střední Evropy nelze očekávat takto vysoké amplitudy, ale i GIC řádově menších amplitud mohou kumulativně přispívat ke zvýšené poruchovosti zařízení elektrizační sítě. Řešitel práce bude pro vybrané úseky vedení české rozvodné sítě modelovat časový vývoj GIC v obdobích se zvýšenou sluneční aktivitou. Práce poslouží pro realistický odhad nebezpečnosti GIC pro českou rozvodnou síť. Postup:

1. Rešerše
2. Seznámení se se vstupními daty, tedy časovými sériemi modelu geoelektrického pole
3. Vytvoření počítačového programu modelujícího GIC z geoelektrického pole za znalosti parametrů vedení
4. Aplikace programu na vybrané úseky elektrizační sítě v ČR
5. Diskuse výsledků

Seznam doporučené literatury:

- [1] Pirjola, R., 2012, Geomagnetically Induced Currents as Ground Effects of Space Weather, Space Science, Dr. Herman J. Mosquera Cuesta (Ed.), ISBN: 978-953-51-0423-0, InTech
- [2] Pulkkinen, A. et al., 2001, Modelling of space weather effects on pipelines. Journal of Applied Geophysics, 48, 233-256
- [3] Kappenman, J. G., 2003, Storm sudden commencement events and the associated geomagnetically induced current risks to ground-based systems at low-latitude and midlatitude locations. Space Weather, 3, 1016, 16 pp
- [4] a další odborné články dle doporučení vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Mgr. Michal Švanda, Ph. D., Astronomický ústav Univerzity Karlovy**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **05.11.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

\_\_\_\_\_  
doc. Mgr. Michal Švanda, Ph. D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studentky

## Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu mojí bakalářské práce panu docentu Michalu Švandovi z Astronomického ústavu AV ČR za jeho ochotu pomoci mi s touto bakalářskou prací, za jeho čas, který mi věnoval, jeho cenné rady a také za poskytnutí potřebných dat k této bakalářské práci.

Za pomoc se získáním dat bych chtěla poděkovat také inženýru Karlovi Fialovi a Jiřímu Brejchovi ze společnosti ČEPS, a.s.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací..

V Praze, 12. května 2019

**Anna Smičková**

## Abstrakt

Cílem práce je poprvé v českých podmínkách vyšetřit amplitudu geomagneticky indukovaných proudů (GIC) v rozvodné síti. Obecně se soudí, že tyto indukované proudy vedou k zvýšené poruchovosti klíčových komponent rozvodné sítě a jejich efekty jsou dobře prokázány v zemích ležících blíže magnetickým pólům (Skandinávie, USA, Kanada, jižní Afrika apod.), kde amplitudy GIC dosahují v bouřlivých obdobích hodnot až stovek ampér. V podmínkách střední Evropy nelze očekávat takto vysoké amplitudy, ale i GIC řádově menších amplitud mohou kumulativně přispívat ke zvýšené poruchovosti zařízení elektrizační sítě. Řešitel práce bude pro vybrané úseky vedení české rozvodné sítě modelovat časový vývoj GIC v obdobích se zvýšenou sluneční aktivitou. Práce poslouží pro realistický odhad nebezpečnosti GIC pro českou rozvodnou síť.

**Klíčová slova:** Geomagnetická aktivita – rozvodné sítě – geomagnetické indukované proudy

**Vedoucí práce:** doc. Mgr. Michal Švanda, Ph.D.

## Abstract

The aim of this bachelor thesis is to investigate for the first time the amplitudes of geomagnetically induced currents in the electric power grid in the Czech Republic. It is generally believed that these currents lead to increased failure rates of components of the power grid. These effects are well proven for countries at higher latitudes – Scandinavia, USA, Canada, South Africa, etc., where the amplitudes reach up to hundreds of amperes during great solar storms. In the central Europe, such large values of GICs are not expected, but even GICs that are of lower amplitudes can cumulatively cause an increased failure rate. The investigator of this thesis will model the time evolution of GICs for a chosen time period of increased solar activity and for selected segments of the power grid. This thesis will serve for a realistic estimate of GIC hazard for the Czech power grid.

**Keywords:** Geomagnetic activity – electric power distribution networks – geomagnetically induced currents

**Title translation:** Geomagnetically induced currents in the Czech power grid

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Rešerše</b>	<b>3</b>
2.1 Slunce .....	3
2.2 Vznik geomagnetických indukovaných proudů .....	4
2.2.1 GIC .....	5
2.2.2 Možnost snížení rizika GIC ...	7
2.2.3 Události spojené s GIC .....	7
2.3 Elektrizací soustava ČR .....	9
2.3.1 Přenosová soustava .....	9
2.3.2 Distribuční soustava .....	10
2.3.3 Parametry venkovního elektrického vedení .....	11
2.4 Studie GIC ve světě .....	12
2.4.1 Finsko .....	12
2.4.2 Švédsko .....	13
2.4.3 Španělsko .....	13
2.4.4 Brazílie .....	13
2.4.5 Čína .....	13
2.5 GIC – ropovod Česká Republika	14
2.5.1 Naměřené hodnoty .....	14
<b>3 GIC</b>	<b>17</b>
3.1 Předpokládané výsledky .....	17
3.2 Rovnice pro výpočet GIC .....	17
3.2.1 Obecná rovnice pro výpočet GIC .....	17
3.2.2 Výpočet impedance a admitance pro dvouuzlové řešení	18
3.2.3 Výpočet impedance a admitance pro tříuzlové řešení .	18
3.2.4 Výpočet indukovaného proudu	19
3.2.5 Implementace .....	20
<b>4 Výsledky</b>	<b>23</b>
4.1 Dvouuzlové řešení .....	23
4.2 Tříuzlové řešení .....	31
<b>5 Závěr</b>	<b>37</b>
<b>A Literatura</b>	<b>41</b>





# Kapitola 1

## Úvod

V dnešní době je jen málo věcí, které se dokáží obejít bez elektřiny. Na elektřině, která nám je většinou bez problémů dodávána neustále až do domů, kde je potřeba k vytápění, uchovávání potravin, přípravě stravy, naší zábavě, také na ulice, kde je zajištěno pouliční osvětlení, které zvyšuje naši bezpečnost, jsme závislí všichni. Závislé na elektřině jsou také nemocnice, obchody, firmy, . . . Elektřina je zkrátka v dnešní době nepostradatelná a v budoucnu tomu nebude jinak. Příkladem toho, že elektřina bude stále využívána, je také elektromobilita.

Co se ale stane, pokud najednou dojde k přerušení dodávky elektrické energie, dojde k takzvanému blackoutu? Jedna z příčin těchto blackoutů mohou být silné geomagnetické bouře, které, pokud naruší geomagnetické pole Země, můžou vést k tomu, že se ve vedení na povrchu Země budou indukovat takzvané geomagnetické indukované proudy (GIC), které mohou zapříčinit až destruktivní poruchy na vedení. Několik takových událostí v minulosti proběhlo a mělo velmi vážné, nejen ekonomické dopady na společnost.

Blackout může postihnout oblasti od rozlohy měst, přes oblast státu až po oblast celého světa. Opravdu silné erupce mohou způsobit velkoplošné až celoplanetární výpadky, zatímco běžné bouřky obvykle způsobí lokální problémy. Nicméně blackout jakéhokoliv rozsahu s sebou vždy nese ekonomické ztráty, způsobené nejen přerušením dodávky energie, ale také případnými opravami komponent rozvodné sítě, většinou transformátorů, které velmi často tyto proudy nevydrží a jejich porucha je tak nejčastější a nejvážnější.

Hlavním cílem této práce je zjistit, jak velké geomagnetické indukované proudy je možné naměřit v České republice, jestli tyto hodnoty proudů mohou způsobit škody a případně jak je možné se proti tomuto chránit. V České republice se jedná o první práci, která vypočítává tyto proudy a mojí oblastí výpočtů budou vedení přenosové soustavy 413 a 475, pro událost Halloweenských bouří a hodnoty těchto dvou vedení mezi sebou také porovnat.



# Kapitola 2

## Rešerše

### 2.1 Slunce

Slunce je naše nejbližší hvězda s velmi silným magnetickým polem. Toto magnetické pole není stále, v čase se neustále mění. Z globálního hlediska je nejdůležitější změnou slunečního magnetismu 11letý cyklus, během něhož se celkový charakter magnetického pole Slunce mění, pole se nejprve zesiluje, dosahuje maxima, posléze zeslabuje a dosahuje minima. Při každém z těchto přibližně 11letých cyklů se však změní celková polarita slunečního magnetického pole, kompletní cyklus má tedy dvojnásobnou délku. S existencí magnetického pole souvisí jevy tzv. sluneční aktivity.[1]

Sluneční aktivita je komplex dynamických jevů, které se v omezeném čase a prostoru vyskytují na, těsně pod i nad slunečním povrchem a souvisejí s lokalizovaným zesíleným magnetickým polem na Slunci. Příkladem sluneční aktivity jsou sluneční skvrny, vysoce lokalizované magnetické komplexy ovlivňující tepelnou rovnováhu přípovrchových vrstev Slunce, které jsou snadno pozorovatelné jednoduchými prostředky. Dalšími jevy jsou i protuberance, vysokorychlostní sluneční vítr, výrony hmoty do koróny nebo sluneční energetické částice. Rychlá explozivní přestavba magnetického pole vede ke sluneční erupci.[2]

Dalším pojmem je kosmické počasí. Kosmické počasí je název pro jevy, které ovlivňují podmínky v zemské magnetosféře (oblast kolem Země, ve které dominuje vliv zemského magnetického pole), ionosféře (ionizovaná část atmosféry významně ovlivňující šíření elektromagnetických signálů) a termosféře (vrstva atmosféry), způsobené Sluncem, speciálně slunečním větrem, které mohou mít vliv na funkci a spolehlivost přístrojů na Zemi a ve vesmíru, ohrožení vlastnictví a lidského zdraví. Parametry slunečního větru jsou velmi přesně sledovány a měří se pomocí přístrojů, které jsou umístěny na družicích v okolí Země. Poruch, které jsou způsobeny kosmickým počasím, je známo velmi mnoho. Například je pozorováno rušení radiových přenosů a poruchy na elektrických rozvodných sítích, ropovodech, plynovodech, kde jsou indukovány geomagnetické indukované proudy. S kosmickým počasím bývají spojovány také poruchy v leteckých a námořních navigačních systémech, které bývají

výraznější během geomagnetických bouřek. Na Zemi často a v oblastech magnetických pólů Země snadno pozorovatelným jevem jsou polární záře, které jsou způsobeny slunečními energetickými částicemi.[3]

Geomagnetická bouře je definována jako narušení magnetického pole Země silným proudem nabitých částic, které unikají ze Slunce například při slunečních erupcích. Během geomagnetické bouře dochází k narušení magnetosféry a ionosféry Země, kde dochází k odrazení radiových elektromagnetických vln, čímž se zhoršuje přenos dat mezi přístroji na Zemi a satelity v okolí Země. Při velmi silných geomagnetických bouřích dochází k úplnému narušení komunikace se satelity a významným problémům jako například nefunkčnost GPS.[4]

Erupce na Slunci narušují magnetosféru Země, která ochraňuje Zemi před vrtoly kosmického počasí. Změny magnetického pole v magnetosféře ale způsobují změny v elektrickém poli Země a opačně. Takže pokud dochází k narušení magnetosféry Země, dochází k indukovaní proudů například na součástech rozvodných sítí, ropovodech nebo plynovodech.

## 2.2 Vznik geomagnetických indukovaných proudů

Kromě vlivu na přenos dat mezi Zemí a satelity mají geomagnetické bouře také vliv na přístroje, které se nacházejí na Zemi. Časově proměnné magnetické pole mimo Zemi indukuje sekundární magnetické pole na Zemi podle Faradayova zákona o indukci, který říká, že elektrické pole na povrchu Země je závislé na časově proměnném magnetickém poli Země. [5]

$$-\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{E}, \quad (2.1)$$

kde  $\mathbf{B}$  je vektor magnetické indukce a  $\mathbf{E}$  vektor intenzity elektrického pole, v našem případě jsou obě veličiny měřeny v těsné blízkosti Země.

Velmi rychlá a výrazná změna intenzity geomagnetického pole Země vede ke změně magnetického toku na určité ploše, a to vyvolá geoelektrické pole. To indukuje na vodičích proudy GIC. Geomagnetické pole, vytváří na Zemi geoelektrický potenciál v řádech jednotek V/km, který má charakter napěťového zdroje mezi přenosovými soustavami, ropovody, plynovody, sítěmi pro přenos dat optickými kabely pro telefonický přenos, telegrafický přenos a železnicemi. Přes fázová vinutí transformátorů tyto proudy protékají do elektrizační soustavy.[6]

Pokud je tento proud dostatečně velký, může způsobit například poruchy transformátorů, které povedou k výpadku elektřiny. [5]

### ■ 2.2.1 GIC

Pro zjednodušení výpočtů můžeme GIC považovat za stejnosměrné, jelikož jejich typická perioda není pravidelná, ale dosahuje hodnot od několika sekund až po hodiny, v závislosti na změnách elektrického pole. Časové změny GIC jsou tedy ve srovnání s proměnností přenášeného elektrického proudu (v Evropě je frekvence 50 Hz) zanedbatelné. Další, co je při výpočtech GIC možné zanedbat je vliv na vedení, jelikož hodnota odporu vedení stejnosměrného proudu je velmi malá.[7]

Během geomagnetických bouří dochází k superponování GIC na provozní proudy a způsobují stejnosměrné půlperiodové přesycení železných jader transformátorů. Tím dochází k zvýšení teploty transformátorů, což může mít až destruktivní následky.[7]

Dalším problémem jsou vyšší harmonické a tím také zvětšení jalových ztrát transformátorů. Pokud jalové ztráty budou velmi vysoké, může dojít k tomu, že se sníží napětí v síti, změní se frekvence proudu v síti a tím dojde k rozpadu sítě, tedy ke kolapsu sítě.[7]

Jelikož k největším změnám magnetického pole a tím i největším problémům s nimi spojeným dochází hlavně ve vyšších zeměpisných šířkách, v severských státech jako Kanada a Skandinávie, jsou GIC velmi pečlivě měřeny od 70. let minulého století. V těchto oblastech je možno naměřit hodnoty těchto proudů desítky až stovky ampérů. Bohužel to ale neznamená, že v oblastech s nižší zeměpisnou šířkou se tyto proudy nemohou objevovat a že by tak tyto oblasti byly bez rizika. Během silných geomagnetických bouřek se tyto GIC mohou objevovat také v těchto oblastech a výjimečně, při geomagnetické bouři, která je náhlá a trvá velmi krátkou dobu také v rovníkových oblastech.[7]

První zmínky o pozorování GIC jsou z let 1847–1848 s příchodem technologických změn. Zaváděním podmořských kabelů, telefonních a telegrafických systémů a železnic se jejich existence začala projevovat.[7]

Jsou identifikovány čtyři různé faktory, které ovlivňují rizikovost GIC:

#### ■ Rezistivita půdy

Parametr, který je závislý na geologii daného místa. Tento parametr ovlivňuje například složení půdy v daném místě, obsah minerálů, charakteristika zemského obalu do hloubky přibližně 100 kilometrů, ale také vlhkost, teplota a klimatické podmínky. Tento parametr je zahrnut do výpočtů a měření odporu vedení a v této práci nebude vypočítáván.

## ■ Poloha rozvodné sítě na Zemi

Při zohledňování tohoto parametru vycházíme z toho, že magnetické pole Země je různorodé. Tedy že na pólech je silnější, a naopak blíže k rovníku je slabší. Dalším důležitým parametrem je orientace vedení – sever-jih, východ-západ. Vyšší hodnoty bývají naměřeny pro vedení, která jsou orientována sever-jih. Pro tuto práci budu tedy počítat s parametry přepočtenými podle os  $x$  a  $y$ , kdy směr  $x$  odpovídá směru západ-východ, zatímco  $y$  směru jih-sever.

## ■ Délka expozice GIC

Tento parametr je daný samotnými GIC. Destrukce transformátorů, což je nejčastější porucha na vedení způsobená GIC, má primárně dvě příčiny. První příčinou může být vypnutí v důsledku vysokých rázů proudu ochranami, nebo přehřátí transformátoru a jeho destrukce kvůli dlouhotrvajícím nižším proudům, řádově desítky minut. Důležitým parametrem je tedy nejen amplituda proudu, ale také délka trvání těchto proudů.[8]

Podle některých autorů má velký vliv na poruchy transformátorů také to, zda daný transformátor byl již v minulosti zatěžován těmito proudy. Předpokládá se, že jejich účinek je kumulativní a je tedy důležité také při zkoumání vlivu na konkrétní transformátor zohledňovat jeho magnetickou minulost. Pokud tedy transformátor byl v minulosti zatěžován těmito proudy, bude se lišit délka doby, za kterou dojde k saturaci v závislosti na tom, zda proudy v minulosti tekly směrem stejným či opačným proudům aktuálním. Dochází ke sčítání toků proudů a jsou-li jejich směry stejné, dojde k saturaci dříve, a naopak pro opačné směry toků bude reakce opožděná.[8]

Pro vybuzení magnetického pole v magnetickém obvodu transformátoru je potřebný takzvaný magnetizační proud. Tento proud transformátorem probíhá i při stavu naprázdno, tedy nezatíženém. Tento proud se skládá ze dvou složek, jedna složka magnetizačního proudu je reprezentovaná jako hlavní indukčnost, tedy hlavní tok v magnetickém obvodu a druhá složka je reprezentovaná hysterzními ztrátami a ztrátami vířivými proudy. Magnetizační charakteristika transformátoru je velmi podobná křivce  $B = f(H)$ , kde  $B$  je indukce magnetického pole a  $H$  jeho intenzita. V důsledku snížení sklonu křivky  $B = f(H)$  v nasycené oblasti se potřebný magnetizační proud výrazně zvyšuje, často stovky až tisíce násobky normálního magnetizačního proudu. V oblasti kolene této křivky je střídavý magnetizační proud asymetrický a zvyšuje tok vyšších harmonických, které ztěžují provoz energetické soustavy a vedou k jeho nestabilitám.[8]

## ■ Geografické efekty

Bylo zjištěno, že neexistuje žádný univerzální předpoklad, že by se GIC chovaly na celé planetě stejně, a proto je velmi důležité zohlednit všechny

faktory zkoumané oblasti, jako je například velikost elektrizační soustavy, délky vedení, ... k výpočtům.

### ■ 2.2.2 Možnost snížení rizika GIC

Stejně jako příčin problémů způsobených GIC, tak i možností, jak snižovat riziko je také několik. Jednou z variant jsou kondenzátory, které se přidávají do obvodů vedení nebo přístroji, které budou generovat kapacitu, pokud budou detekovány tyto proudy v síti a bude je třeba omezit. U extrémně ohrožených transformátorů by se mohla zapojit zařízení, která by omezovala proudy přes neutrály transformátorů do jejich uzemnění, a tak zabránit jejich destrukci. Další z možností je také to, že při varování na možnou zvýšenou sluneční aktivitu by se omezila nebo úplně přerušila dodávka energie, a tak nebyly následky tak velké.

V dnešní době jsou přenosové soustavy zemí, které jsou přímo ohroženy vybaveny těmito zařízeními a nové transformátory již jsou navrhovány a vyráběny s ochranami pro GIC.

Minimalizace rizik je z toho důvodu, že nejsme schopni přesně předpovědět událost, která by mohla znamenat katastrofu tedy velmi složitá a jsou oblasti, ve kterých jsou tato řešení pravděpodobně zbytečná. Proto je velmi důležité zpracovat výzkumy, které by mohly pomoci v rozhodování.

Přístroje jsou totiž velmi nákladné a přerušení dodávky prakticky nemyslitelné. Pokud by navíc došlo k přerušení na základě tohoto varování a následně by se neprokázalo žádné nebezpečí, v budoucnu by nejspíš na tyto varování nikdo nebral zřetel.

### ■ 2.2.3 Události spojené s GIC

V minulosti můžeme zaznamenat několik událostí, které jsou spojovány s geomagnetickými bouřemi. V této práci se speciálně zaměřím na události, jejichž příčinou byly GIC.

#### ■ 1859 – Carringtonova událost

Když dne 1. září dva na sobě nezávislý astronomové zaznamenali poprvé sluneční erupci a později došlo také k zaznamenání jedné z největších geomagnetických bouří, vědci si pomalu začali dávat tyto události do souvislosti. Při této erupci bylo ze Slunce směrem k Zemi uvolněno obrovské množství hmoty a na Zemi docházelo například k tomu, že polární záře, která se v daných místech neobjevovala dosahovala takové intenzity, že se lidé v noci budili s tím, že je den. Dalším problémem způsobeným na zemském povrchu byly poruchy telegrafních systémů v Severní Americe a Evropě, kde na telegrafních sloupech přeskakovaly výboje, které poranily některé operátory, kteří zrovna na vedení pracovali, elektrickým proudem. [9]

## ■ 1921 – NEW YORK

Dne 10. května se na Slunci objevila sluneční skvrna, která byla pozorovatelná až do 15. května. Velikost této sluneční skvrny byla přibližně 131 000 km na 33 800 km. Dne 13. došlo k velkému výronu do koróny, a tak k narušení magnetosféry Země. Důsledky se objevily dne 15. května, kdy došlo k výpadku proudu v newyorském metru jižně od 125. ulice. Této události bývá přisuzován také požár budovy na 57. ulici. Velkým štěstím, že tato událost neměla daleko větší dopad bylo to, že v této době nebyl elektrický systém spojen a proudy se tak nemohly vedením šířit. Pokud by byla síť propojena, mohlo by dojít k daleko větším problémům. [10]

## ■ 1989 – QUEBEC

Jednou z nejvýznamnějších událostí byla událost, která nastala 13. března 1989 v kanadské provincii Quebec. Dne 10. března, tedy tři dny před událostí astronomové zaznamenali velmi silnou sluneční explozi. Během pár minut se ze Slunce směrem k Zemi, rychlostí milionu kilometrů za hodinu, uvolnilo ohromné množství tun oblaku plynu. Již během několika minut tato exploze způsobila poruchy v radiových přenosech. [11]

Dne 12. března se oblak plazmatu dostal do magnetosféry Země, kde způsoboval další problémy. V oblasti Floridy a Kuby, kde to není obvyklé, byly pozorovatelné polární záře. Vlivem změny magnetického pole Země došlo k indukovaní proudů na Zemi, které se v brzkých ranních hodinách 13. března dostaly do rozvodné sítě v Quebecu, kde během necelých 2 minut způsobily celkový výpadek dodávek proudu v této oblasti. Následný 12 hodinový blackout odfázil od energie miliony lidí. V Severní Americe došlo také k mnohým problémům, spojeným s výpadkem proudu v Quebecu. Například v New Yorku došlo ke ztrátám výkonu přibližně 150 MW, v oblasti Nové Anglie to bylo 1410 MW. To celé nastalo v jeden okamžik. Tento významný pokles energie způsoboval problémy v rozvodných sítích okolních oblastech, naštěstí ale nedošlo k tomu, že by vypadly vlivem nerovnoměrnosti poklesu napětí všechny sítě a nenastal blackout i v těchto oblastech. Další zdroje elektřiny v okolí byly schopny tyto ztráty alespoň částečně vykompenzovat. [12]

## ■ 2003 – SEVERNÍ EVROPA

V roce 2003 byly po celém světě pozorovány následky sluneční aktivity, která je označovaná jako jedna z největších za poslední roky. Tyto události jsou známy pod názvem Halloweenské bouře. Dne 29. října došlo ke geomagnetické bouři, která trvala 27 hodin. Naštěstí následky této bouře nebyly tak výrazné, jak by mohly být, pokud by oblak elektricky nabitých částic směřoval přímo na Zemi. V tomto případě se k Zemi dostal pod úhlem 20°. I přes to, že následky mohly být daleko výraznější, dopady této sluneční bouře byly obrovské. [13]



Došlo například k přerušení těžby ropy a plynu na Aljašce a k zastavení geofyzikálních průzkumů po celém světě. V severní Evropě došlo vlivem GIC k blackoutu, který trval asi hodinu a nastal mezi Švédskem a Dánskem následně po poruše transformátorů. Hodnoty GIC při této události byly 600 A, naměřeny ve švédském městě Malmö. Také ztráta satelitu ADEOS 2 je přisuzována této události. [14]

Celkové škody, které tato událost způsobila byly vyčísleny přibližně na 0,5 miliónů USD.

## ■ 2.3 Elektrizací soustava ČR

Elektrizací soustava je pojem, který je definován jako soubor zařízení pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektřiny, zahrnující také prvky jako elektrické přípojky a přímé vedení, systémy měřící, ochranné, řídicí a zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky. Mezi základní funkce patří zajištění dostatečného množství elektrické energie v požadovaném čase, zajištění kvality, spolehlivosti dodávky a maximální ekonomie.[15]

Výroba elektrické energie je prakticky přeměna primárních zdrojů na elektrickou energii. Zdroje pro výrobu se dají rozdělit na zdroje prvotní (těžba), druhotné (ztráty při přeměnách) a zdroje vyrobené (zusušlechtné). Tyto zdroje mají také rozdělení podle toho, zda jsou obnovitelné nebo neobnovitelné. Mezi obnovitelné zdroje patří ty zdroje, které mají schopnost se obnovit zcela, nebo alespoň částečně samy, nebo za pomoci člověka (voda, vítr, sluneční záření, bioplyn, biomasa). Neobnovitelné zdroje jsou ty zdroje, které jsou dostupné pouze v určitém množství a nejde je obnovit.[15]

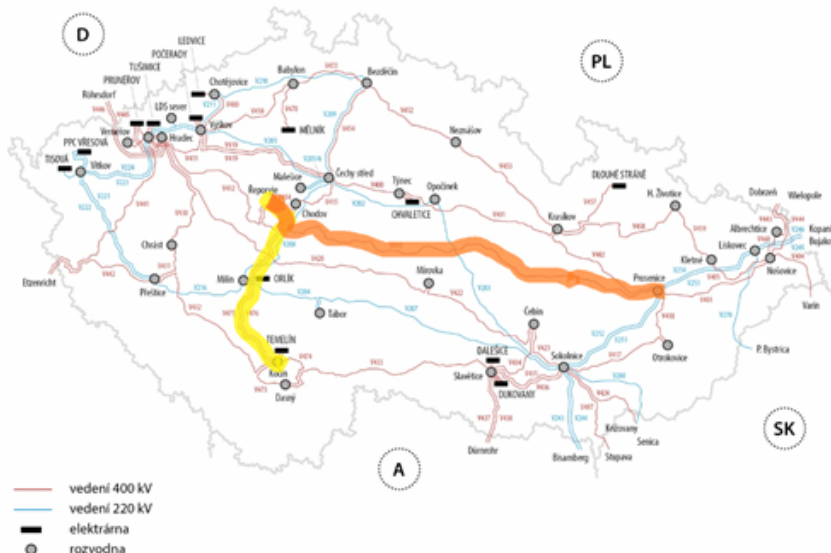
Elektrizací soustava se dělí na přenosovou a distribuční soustavu.

### ■ 2.3.1 Přenosová soustava

Přenosová soustava je soubor vedení a zařízení v hladinách napětí 400 kV, 220 kV a 110 kV, která slouží pro přenos elektřiny v České republice a také pro propojení naší elektrizační soustavy se soustavami okolních států. Přenosová soustava má na starosti přenos energie mezi výrobcí elektrické energie až po velké rozvodny. Pro snížení úbytků napětí na dlouhých vedení se zvyšuje napětí, aby pro přenos stejného výkonu stačil menší proud. Ztráty jsou totiž úměrné druhé mocnině tohoto proudu. V České republice provozuje přenosovou soustavu firma ČEPS.

Vedení může být provozováno jako kabelové vedení či vedení venkovní. Pro přenos elektrické energie v hladinách napětí 400 kV a 220 kV se v České republice používá venkovní vedení.

Schéma sítí 400 kV a 220 kV



Obrázek 2.1: Schéma sítí přenosové soustavy v ČR.[16]

Na obrázku můžeme vidět schéma sítí přenosové soustavy v České republice provozované společností ČEPS. Žlutě je znázorněno vedení 475 z Kočína do Řeporyjí a oranžovou barvou vedení 413 vedoucí z Prosenic do Řeporyjí, pro které budu vypočítávat hodnoty GIC. Vedení 475 má celkovou délku 137,7 km a vedení 413 má délku 283,7 km, tedy více než dvojnásobnou. Obě tyto vedení využívají rozvodnu Řeporyje, a proto bude možné vypočítat hodnoty GIC nejen pro jednotlivá vedení – takzvanou dvojuzlovou metodou, ale také pro zjednodušené vedení se třemi zemními body vedoucí z Prosenic do Kočína.

### 2.3.2 Distribuční soustava

Distribuční soustava je soubor vedení a zařízení velmi vysokého napětí – 110 kV, vysokého napětí 35 kV, 22 kV, 10 kV, 3 kV a nízkého napětí 400 V/230 V, která slouží pro distribuci elektřiny od rozveden ke konečnému spotřebiteli. V této soustavě jsou zahrnuty také měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační systémy. V České republice jsou tři provozovatelé, kterými jsou pro většinu území ČEZ, pro Prahu PRE a pro jih republiky E.ON. Distribuční vedení se dělí na další podskupiny. První dělení je dělení podle spolehlivosti zásobování – bez rezervy nebo s rezervou. Další dělení je podle uložení elektrického vedení, které je venkovní, kabelové (v zemi, kanálech nebo závěsné) nebo také smíšené.

Pokud v přenosové soustavě dojde k překročení statické nebo dynamické meze stability, dojde ke ztrátě synchronismu strojů na výrobu elektřiny v soustavě a následnému rozpadu sítě na takzvané izolované ostrovy. Následný zpětný návrat k spojení soustav se provádí několika možnými způsoby, například obnovou napětí ze sousedních přenosových soustav, distribuční soustavy nebo také elektrárnami, které jsou schopny „startu ze tmy“.

### 2.3.3 Parametry venkovního elektrického vedení

Máme 4 primární elektrické parametry

1. **Činný odpor – Rezistence  $R$  [ $\Omega/\text{km}$ ]** – Ovlivněno: materiálem, teplotou, skinefektem, prodloužením, kroucením dílčích vodičů, průhybem, nerovnoměrností průřezu, spojkami, rozložením proudové hustoty. U venkovních vedení je stejné jako u kabelových, u jednožilových je zde nárůst  $R$ , způsobený vířivými proudy a hysterezními ztrátami v kovovém plášti.
2. **Provozní indukčnost  $L$  [ $\text{H}/\text{km}$ ]** – Provozní indukčnost jednoho vodiče vyvolá stejný úbytek napětí jako v soustavě několika vodičů.
3. **Provozní kapacita  $C$  [ $\text{F}/\text{km}$ ]** – Osamocený vodič má stejný náboj jako v soustavě vodičů. Kapacita vodiče celoplastového, bez vodivého pláště se mění podle způsobu uložení a okolí. Pro jednožilové vodiče s kovovým pláštěm nebo vícežilové s pláštěm pro každý vodič je pouze kapacita vodiče proti plášti. Pro vodiče trojžilové se společným pláštěm jsou kapacity mezi vodiči i mezi pláštěm a vodiči. Kapacity kabelů pro kabelové vedení jsou několikanásobně větší než kapacity venkovních vedení. Proto kvůli nabíjecím proudům je pro kabelové vedení omezení na délku.
4. **Svod – konduktance  $G$  [ $\text{S}/\text{km}$ ]** – Svod způsobuje činné ztráty svodem k zemi (přes izolátory, pro venkovní vedení dominantní přes korónu). Závislé na napětí, povětrnostních podmínkách a druhu vodičů, málo závislé na zatížení. Je dán dielektrickými ztrátami.

Z těchto parametrů můžeme dopočítat sekundární parametry

Indukční reaktance  $X$  [ $\Omega/\text{km}$ ]

Kapacitní vodivost – susceptance  $B$  [ $\text{S}/\text{km}$ ]

Podélná impedance  $Z$  [ $\Omega/\text{km}$ ]

Příčná admitance  $Y$  [ $\text{S}/\text{km}$ ]

Vlnová impedance  $Z_v$  [ $\Omega$ ]

Konstanta přenosu  $\gamma$  [ $\text{km}^{-1}$ ]

$\alpha$  – měrný útlum

$\beta$  – měrný posuv

Z těchto parametrů jsou pro výpočet GIC nejvýznamnější příčná admitance a vlnová impedance.

$$\hat{Z}_{11} = R_1 + jX_1 \quad [\Omega/\text{km}], \quad (2.2)$$

$$\hat{Y}_{q1} = G_1 + jB_1 \quad [\text{S}/\text{km}], \quad (2.3)$$

kde  $Z_{11}$  je podélná impedance,  $R_1$  je činný odpor a  $X_1$  je indukční reaktance.  $Y_{q1}$  je příčná admitance,  $G_1$  je konduktance a  $B_1$  je susceptance.

Pro sítě nn převažuje  $R$ , pro vn  $R$  a  $L$ , pouze při poruchách  $C$  a pro vvn  $R$ ,  $L$ ,  $G$ ,  $C$ . Vodiče venkovních vedení se vyrábí jako lana z jednoho nebo více materiálů, kterým mohou být měď, hliník, slitiny, kompozity, optická vlákna nebo vysokoteplotní materiály nebo také vodiče s plným průřezem. Velmi častým provedením je kombinace AlFe, kdy železo tvoří střed a hliník venkovní duši.

Jelikož pro výpočty GIC zanedbáváme jejich frekvenci, považujeme je tedy za stejnosměrné, úplatní se při výpočtech pouze činný odpor a konduktance.

## 2.4 Studie GIC ve světě

Mnoho zemí světa, na základě předešlých událostí, které by mohly znamenat významné potíže, vypracovávají studie zabývající se výpočty GIC. Především se jedná o země jako Kanada, Čína, Skandinávie, . . . ze sousedních zemí je to pouze Rakousko. Pro Českou republiku tento výzkum zatím proveden nebyl.

### 2.4.1 Finsko

Finsko je jedna z nejdůležitějších zemí, která provádí výzkum v oblasti výpočtů GIC a návrhu ochran, jelikož je svojí polohou náchylnější k těmto katastrofám a jsou k tomu nepřímou nuceni. V této zemi se podařilo určit přesný teoretický model pro výpočet GIC. [17]

V roce 2000 odborníci z Finska společně s odborníky z Velké Británie publikovali studii, která byla velmi důležitá pro pochopení příčin problémů v elektrické soustavě. Ve sledovaném období byla většina vzniklých GIC spojena se subbouří, pouze několik málo amplitud na začátku období bylo způsobeno geomagnetickou bouří. Rozdíl je patrný například z periody, která je pro GIC mezi 2 a 15 minutami a dají se tak rozlišit tyto dvě události. Z tohoto je zřejmé, že v této oblasti dochází také k problémům způsobeným subbouřemi a je proto velice důležité sledování i těchto událostí, které mohou být také velice nebezpečné a způsobovat problémy v sítích. [17]

Pokud budou parametry, které zvyšují pravděpodobnost poruch sledovány, bude možné velice přesně předpokládat GIC a bude možné předejít případným výpadkům proudu. S příchodem nových technologií, které by mohly

zajistit sledování dynamických ionosférických proudů bychom se v této oblasti předpovědi mohli dostat dále. [17]

### ■ 2.4.2 Švédsko

Švédsko je jednou ze zemí, která byla přímo postižena událostmi Halloweenových bouří, při kterých došlo k několikahodinovému výpadku proud. Speciálně pro tyto události byly provedeny výpočty a měření GIC, kde byly zjištěny hodnoty GIC až několika stovek ampérů. Při této události bylo příčinou výpadků harmonické zkreslení způsobené GIC a také příliš citlivé ochranné relé, které bylo nastaveno na nízkou hodnotu a měl tedy velmi vysokou citlivost na třetí harmonickou základní frekvence systému. Nedošlo tak k přímému poškození transformátoru, ale pouze k výpadku následkem ochran, takže bylo možné rychlé obnovení soustavy.

### ■ 2.4.3 Španělsko

Jako první pro zemi jižní Evropy byl výzkum vypracován ve Španělsku, kde byly použity data z geomagnetické observatoře v severovýchodní části Španělska Katalánii ve městě Ebro. Výpočty byly provedeny pro události se zvýšenou sluneční aktivitou, kdy se daly předpokládat vyšší hodnoty GIC. Zároveň byly tyto vypočtené hodnoty porovnány s hodnotami naměřenými na neutrále transformátoru, aby se dokázala správnost výpočtů. Potvrdilo se, že pro přesnější výpočty je potřeba větší znalosti konduktivity Země a že i přes malou zeměpisnou šířku mohou GIC způsobit problémy i zde. [18]

### ■ 2.4.4 Brazílie

Další ze zemí, která se nachází v oblasti s menší zeměpisnou šířkou, kde byly provedeny výzkumy v oblasti měření a výpočtů GIC. Poprvé pro událost v roce 2004 byly měřeny GIC pro 500kV soustavu. Získané hodnoty GIC byly přibližně 15–20 A. Tyto hodnoty jsou sice několikanásobně nižší než hodnoty naměřené například ve Švédsku, ale amplituda těchto proudů není jediným parametrem, který může způsobit problémy. Amplitudy těchto proudů totiž závisí na časové derivaci geomagnetického pole a rezistivity zemského povrchu. Je tedy možné, že i v této oblasti GIC mohou způsobovat velké problémy. Je tedy velmi důležité, aby se i v budoucnosti sledovalo kosmické počasí a probíhalo dlouhodobější měření GIC magnetometry umístěnými pod vedením a ampérmetry GIC na neutrálech transformátorů. [19]

### ■ 2.4.5 Čína

V roce 2004 byly změřeny prozatím nejvyšší hodnoty v jaderné elektrárně v čínském Ling'ao 47,2 A a 75,5 A, v této oblasti jsou vedení přenosové soustavy dlouhé i 800 km. Důvodem těchto měření byly občasné rušení v přenosové soustavě a cílem bylo prokázat, zda je zde spojitost s GIC, což se prokázalo. Bylo zjištěno, že kvůli malým rezistencím vedení, délce vedení

a také jednofázovým transformátorům, které jsou na síti velmi vysokého napětí instalovány je velmi důležité tyto GIC v oblasti dále zkoumat, jelikož by mohlo dojít k velkým problémům. Touto studií bylo tedy také prokázán problém GIC nejen pro oblasti s velkou zeměpisnou šířkou, ale také střední či malou. Problémy s GIC pro Čínu se nyní dají předpokládat ještě mnohem větší, jelikož Čína postavila a provozuje přenosové vedení, které přenáší napětí 1000 kV a má mnohem menší rezistivitu než vedení, se kterým se ve výzkumu počítalo. Důvodem toho, proč Čína provozuje takové vedení je snížení ztrát na vedení a zvýšení přenosového výkonu.[20]

## 2.5 GIC – ropovod Česká Republika

V roce 2005 provedli P. Hejda a J. Bochníček studii, která se zabývá porovnáním výsledků měření elektrického potenciálu na ropovodech s výsledky měření magnetického pole Země, které proběhlo na měřící stanici Budkov, ze kterých elektrický potenciál vypočetli a tyto výsledky porovnávali. Důvodem jejich studie bylo dokázat, zda i v naší zemi může mít GIC vliv na vedení, i přes naši zeměpisnou šířku. Tato studie je prozatím jediná, která se zabývala výpočty indukovaných napětí souvisejících se geomagnetickou aktivitou v České republice. Stejně jako já v této práci, zabývali se událostmi Halloweenských bouří v roce 2003. [21]

V České republice se nachází dva ropovody, které přivádí ropu ze zemí, kde se těží. První, který byl postaven v 60. letech minulého století, přivádí ropu z Ruska – Družba a druhý, který byl vystavěn v 90. letech z Ingolstadtu – IKL. Tyto ropovody mají několik rozdílů, které jsou například rozdílné ochranné prvky. Katodová ochrana ropovodu před korozí Družba je 1,2 V a IKL 2 V.[21]

Data, se kterými tato studie pracovala jsou získané z několika měřících míst na ropovodech, kde se získávají s periodou 30 vteřin. Takovýchto míst je přibližně 80, použity byly pouze 3 – Ořechov, Svatá Kateřina a Havlíčkův Brod. Výpočty jsou zjednodušeny také tím, že Země je nahrazena polokoulí s hladkým povrchem, Země je považována za homogenní s konstantní konduktivitou a geomagnetické pole země je konstantní na celé oblasti.[21]

### 2.5.1 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty amplitud napětí ze stanice Svatá Kateřina jsou v porovnání s hodnotami z Ořechova větší, rozdíly jsou způsobeny tím, že stanice jsou na jiných ropovodech a také polohou v části ropovodu. Výsledné hodnoty napětí ze stanice Havlíčkův Brod jsou silně zarušené a nelze z nich prokazatelně poznat vliv geomagnetické bouře, to může být způsobeno elektromagnetickým polem z industriální zóny v blízkosti měřící stanice. Rozdíly mezi hodnotami z různých stanic jsou způsobeny rozdílnými vlastnostmi země a technickými vlastnostmi ropovodů v daném místě. Velmi důležitý je také ochranný povrch ropovodu, který pokud je dokonale nanesen, nebyla by potřeba katodové

ochrany, na druhou stranu ale způsobuje větší napětí mezi ropovodem a Zemí, což způsobuje opět korozi.

Rezistivita ropovodu Družba, který je pokrytý asfaltem, je menší než rezistivita ropovodu IKL, který má ochrannou vrstvu polyethylenu.

Jedna z největších špiček v grafu pro hodnoty ze stanice Svatá Kateřina je zaznamenaná ve stejný okamžik, kdy došlo k výpadku proudu ve Švédsku. Z hodnot tedy lze soudit, že i pro Českou republiku, která se nachází v menší zeměpisné šířce je možný vliv GIC. Pro přesnější výsledky a závěry by bylo potřeba rozsáhlejší měření, kde by bylo známo více hodnot a mohli jsme tak pozorovat vliv geomagnetické bouře na napětí na ropovodech.





## Kapitola 3

### GIC

#### 3.1 Předpokládané výsledky

I přes to, že poloha naší země a vedení, s kterými pracuji, není v oblasti, která by měla být ohrožena problémy s GIC – střední zeměpisná šířka, a že v České republice je nejvyšší hladinou rozvodné sítě napětí 400 kV, což není v porovnání například s vedením v Číně nebo USA zvláště vysoké, předpokládáme, že i zde tyto hodnoty mohou dosahovat hodnot, které by mohly způsobit problémy. Obzvláště při velké geomagnetické bouři.

Pro porovnání jsem zvolila vedení 475 a 413, které jsou orientovány sever – jih a východ – západ. Předpokladem je, že hodnoty naměřených GIC by měly být vyšší pro delší vedení a také pro vedení sever – jih by tyto hodnoty měly být vyšší. Předpokládáme tedy vyšší hodnoty GIC pro vedení Kočín – Řeporyje.

#### 3.2 Rovnice pro výpočet GIC

##### 3.2.1 Obecná rovnice pro výpočet GIC

GIC jsou proudy, které jsou indukovány působením magnetického pole Země na vedení, proto pro výpočet budeme zohledňovat parametry vedení, elektromagnetické pole a také závislost polohy na Zemi.

Geomagnetické indukované proudy se vypočítají pomocí následujícího vzorce [22]

$$\mathbf{I}_e = (\mathbf{1} + \mathbf{Y}_n \mathbf{Z}_e)^{-1} \cdot \mathbf{J}_e, \quad (3.1)$$

kde  $\mathbf{Y}_n$  je admitance,  $\mathbf{Z}_e$  impedance a  $\mathbf{1}$  jednotková matice.  $\mathbf{J}_e$  indukovaný proud tekoucí vedením za předpokladu tzv. perfektního uzemnění. Výsledné proudy  $\mathbf{I}_e$  jsou hledanými GIC protékajícími zemnicím vedením příslušného uzlu. Rovnice (3.1) je maticovou rovnicí pro vektor  $\mathbf{I}_e$  s  $N$  prvky odpovídajícími počtu uzemněných uzlů uvažované sítě. Jednotková matice má pak rozměr  $N \times N$  a prvky matic impedancí a admitancí s rozměry  $N \times N$  jsou

definovány pomocí

$$Y_{n,im} = -\frac{1}{R_{n,im}} \text{ pro } i \neq m, \quad Y_{n,im} = \sum_{k=1, k \neq i}^N \frac{1}{R_{n,ik}} \text{ pro } i = m, \quad (3.2)$$

kde  $R_{n,im}$  jsou rezistance vodičů spojujících uzly  $i$  a  $m$  ( $i, m = 1, \dots, N$ ). Pokud dva uzly nejsou přímo propojeny vedením, rezistance mezi nimi přirozeně získává nekonečnou hodnotu.

$$Z_{e,im} = R_i, \text{ pro } i = m, \quad Z_{e,im} = 0 \text{ pro } i \neq m, \quad (3.3)$$

kde  $R_i$  je zemnicí rezistance uzlu  $i$ .

### ■ 3.2.2 Výpočet impedance a admitance pro dvouuzlové řešení

Parametry vedení, jako zemnicí odpory rozveden na vedení, které počítám, odpory vedení a také souřadnice těchto vedení jsem získala od společnosti ČEPS, a. s. Následujícími vztahy jsem získala potřebné veličiny:

$$R_{12} = Rd \quad (3.4)$$

kde  $R$  je měrný odpor vedení, který byl zadán jako počet Ohmů na kilometr vedení a  $d$  je délka vedení. Výsledkem je odpor  $R_{12}$  vedení mezi dvěma zemnicími uzly. V mém případě jsem počítala GIC v dvouuzlovém řešení pro vedení 413 (Řeporyje–Prosenice) a 475 (Kočín–Řeporyje),  $R_1$  a  $R_2$  jsou zadane hodnoty zemnicích odporů pro rozvodny v příslušných uzlech (Řeporyje, Kočín a Prosenice).

Pro dvouuzlové vedení se rovnice (3.2) a (3.3) zjednoduší na následující vzorce.

$$\mathbf{Y} = \frac{3}{R_{12}} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \text{ a} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{pmatrix}. \quad (3.6)$$

Trojka v čitateli výpočtu admitance symbolizuje zohlednění třífázového vedení, zatímco měrné odpory jednotlivých vodičů byly zadány pro jedinou fázi.

### ■ 3.2.3 Výpočet impedance a admitance pro tříuzlové řešení

Z obecných rovnic pro výpočet impedance a admitance (3.2) a (3.3) přejdeme k řešení pro tříuzlové vedení, tedy vedení se třemi uzemněnými body v topologii Kočín(1)–Řeporyje(2)–Prosenice.

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \frac{3}{R_{12}} & -\frac{3}{R_{12}} & 0 \\ -\frac{3}{R_{12}} & \frac{3}{R_{12}} + \frac{3}{R_{23}} & -\frac{3}{R_{23}} \\ 0 & -\frac{3}{R_{23}} & \frac{3}{R_{23}} \end{pmatrix} \text{ a} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} R_1 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 \end{pmatrix}, \quad (3.8)$$

kde  $R_{12}$  je odpor mezi prvním a druhým zemnicím bodem (Kočín–Řeponyje) a  $R_{23}$  je odpor mezi druhým a třetím zemnicím bodem (Řeponyje–Prosenice).  $R_1$ ,  $R_2$  a  $R_3$  jsou zemnicí odpory v jednotlivých uzlech a jsou zadány.

### 3.2.4 Výpočet indukovaného proudu

V rovnici (3.1) vystupuje indukovaný proud tekoucí vedením mezi uzly, jehož komponenta pro uzel  $m$  se vypočítá pomocí následujícího vzorce:

$$J_{e,m} = \sum_{i=1, i \neq m}^N \frac{V_{im}}{R_{n,im}}, \quad (3.9)$$

kde  $V_{im}$  je geomagnetické napětí, vypočtené z následující rovnice:

$$V_{im} = \int_i^m \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}, \quad (3.10)$$

kde se integruje podél křivky  $s$  reprezentující příslušné vedení mezi uzly  $i$  a  $m$ . Veličina  $\mathbf{E}$  je intenzita geoelektrického pole, která je zadaná [23]. Napětí  $V_{im}$  je antisymetrické vůči záměně  $i$  a  $m$  z důvodu opačné orientace integrační cesty. Pro dvouuzlové řešení nabývá vektor  $\mathbf{J}_e$  formy

$$\mathbf{J}_e = \frac{1}{R_{12}} \begin{pmatrix} V_{12} \\ -V_{12} \end{pmatrix}, \quad (3.11)$$

pro tříuzlové vedení v orientaci Kočín(1)–Řeponyje(2)–Prosenice(3) pak

$$\mathbf{J}_e = \begin{pmatrix} \frac{V_{12}}{R_{12}} \\ -\frac{V_{12}}{R_{12}} + \frac{V_{23}}{R_{23}} \\ -\frac{V_{23}}{R_{23}} \end{pmatrix}. \quad (3.12)$$

Pro vedení napnuté mezi stožáry lze vzorec (3.10) přepsat do diskretizované formy

$$V_{im} = \sum_{k=i}^m (E_x \Delta x_k + E_y \Delta y_k), \quad (3.13)$$

kde  $E_x$  a  $E_y$  jsou komponenty intenzity geoelektrického pole ve směrech  $x$  a  $y$ . Úseky  $\Delta x_k$  a  $\Delta y_k$  jsou průměty úseku vedení do os  $x$  a  $y$ . Souřadnice konců úseků vedení byly zadány v souřadnicích zeměpisné šířky a délky a tyto souřadnice stožárů vedení jsem přepočítala programem ze vzorců tak, abych získala vektorově orientované parametry výpočty přes azimut pomocí Haversinovy formule a došlo tak k zjednodušení vedení na lomenou čáru:

$$a_k = \sin^2(\Delta\varphi_k/2) + \cos\varphi_{k1} \cos\varphi_{k2} \sin^2(\Delta\lambda_k/2), \quad (3.14)$$

$$c_k = 2 \arctan \frac{\sqrt{1 - a_k}}{\sqrt{a_k}}, \quad (3.15)$$

$$d_k = R_{\oplus} c_k \quad (3.16)$$

$$\theta = \arctan \frac{\cos \varphi_{k1} \sin \varphi_{k2} - \sin \varphi_{k1} \cos \varphi_{k2} \cos \Delta \lambda_k}{\sin \Delta \lambda_k \cos \varphi_{k2}}, \quad (3.17)$$

kde  $\varphi_{k1}$  a  $\varphi_{k2}$  je zeměpisná šířka koncových bodů úseku  $k$ ,  $\lambda_k$  jejich zeměpisná délka a  $R_{\oplus}$  je poloměr Země.  $\Delta \varphi_k = \varphi_{k2} - \varphi_{k1}$  a  $\Delta \lambda_k = \lambda_{k2} - \lambda_{k1}$ .

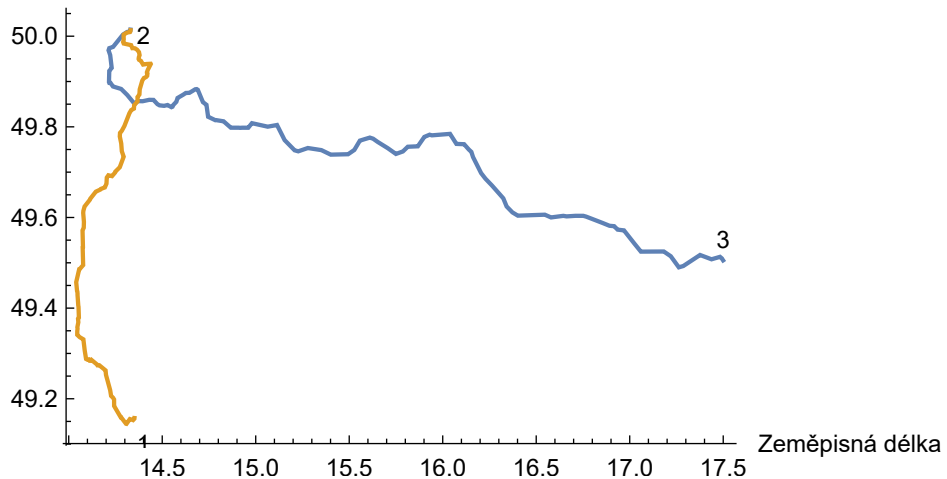
Výsledné délky úseků jsou pak  $\Delta x_k$  a  $\Delta y_k$  se vypočítal dosazením do vzorců

$$\Delta x_k = d_k \cos(90^\circ - \theta) \quad (3.18)$$

$$\Delta y_k = d_k \sin(90^\circ - \theta). \quad (3.19)$$

Schématická mapa vedení 413 a 475 vykreslená v zeměpisných souřadnicích je zobrazena na obrázku 3.1 společně s číselnými identifikátory jednotlivých rozvodů.

Zeměpisná šířka



**Obrázek 3.1:** Tento obrázek zobrazuje vedení, se kterými jsem počítala. Bodem 1 je označena rozvodna Kočín, bodem 2 rozvodna Řeporyje a bod 3 rozvodna Prosenice. Toto schéma je vytvořeno také v programu Mathematica a sloužilo také ke kontrole výpočtů

### 3.2.5 Implementace

Řešením rovnice (3.1) je vektor proudu  $\mathbf{I}_e$ , jehož dimenze odpovídá počtu uvažovaných uzlů. Konvence je taková, že kladný proud značí proud z vedení do Země a záporný proud je ze Země do vedení.

Časový vývoj těchto proudů je řešen sekvencí stacionárních modelů. Pro každý čas se provádí výpočty znovu, jelikož se mění hodnoty  $E_x$  a  $E_y$ . Tento způsob je možný z toho důvodu, že časová proměnlivost  $\mathbf{E}$  je pomalejší než

perioda změn střídavého proudu.

Pro řešení potřebných rovnic jsem napsala program v prostředí Mathematica. Do programu se importují zadané komponenty geoelektrického pole pro sekvenci stacionárních modelů s minutovou kadencí. Dále se importují souřadnice stožárů vedení 413 a 475 laskavě poskytnuté společností ČEPS, a.s. Pozice jsou zadané v zeměpisných souřadnicích, pomocí rovnic (3.18), (3.19) a souvisejících byly vypočteny směrové vektory jednotlivých úseků a integrací skalárního součinu elektrického pole a směrového vektoru úseků přes celé vedení vypočteno indukované napětí podle rovnice (3.10) a souvisejících. Z něho pak byly vypočteny indukované proudy s „perfektním uzemněním“  $\mathbf{J}_e$  a dále geomagnetické indukované proudy protékající zemněním  $\mathbf{I}_e$ .

Řešení pro napětí a hodnoty geomagnetických indukovaných proudů v závislosti na čase jsem vykreslila do grafů.

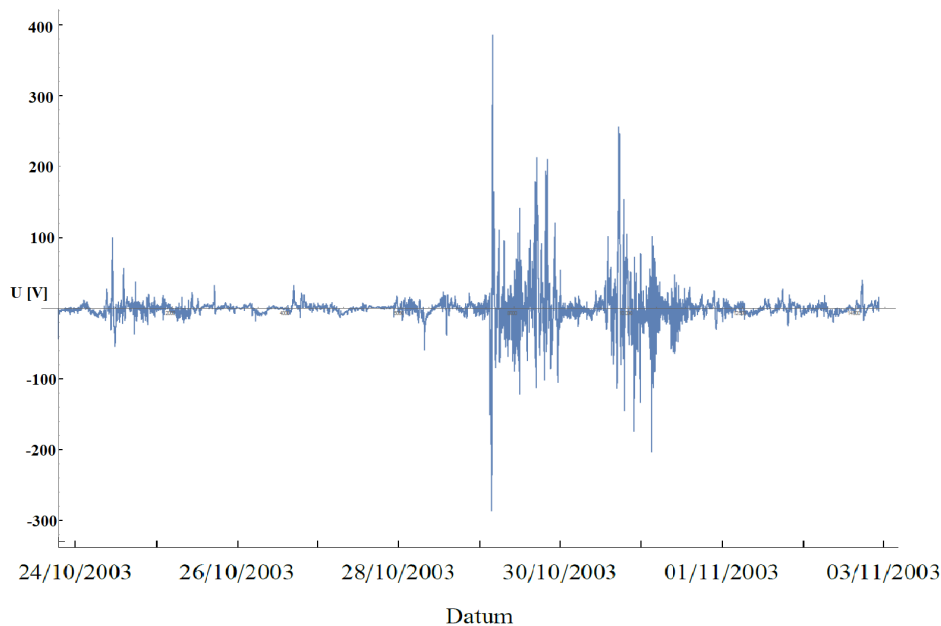


## Kapitola 4

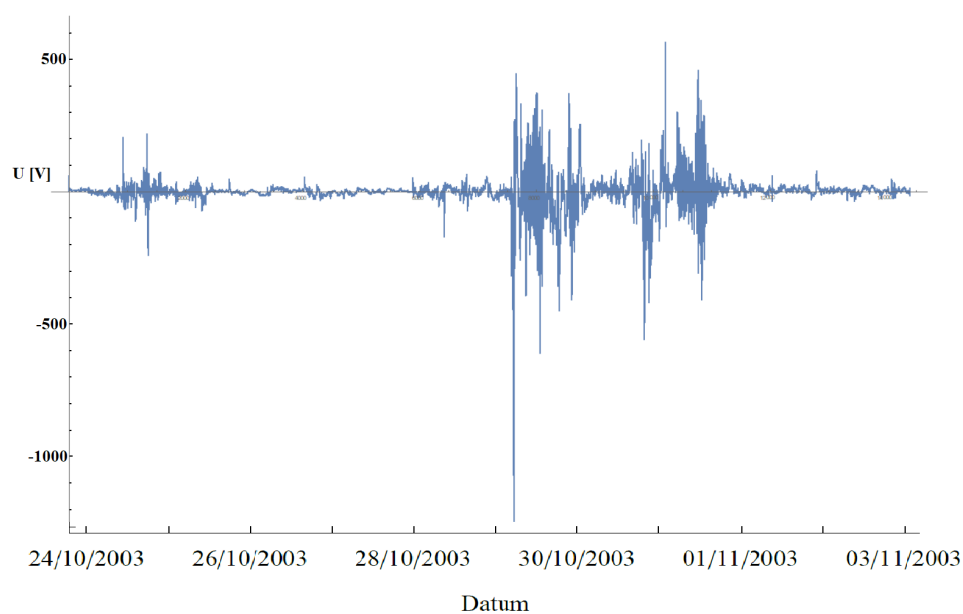
### Výsledky

#### 4.1 Dvouuzlové řešení

Nejprve jsem vypočetla řešení pro dvouuzlové přiblížení zvláště pro vedení 413 (Řeporyje-Prosenice) a 475 (Řeporyje-Kočín). Výsledky pro indukované napětí na vedení jsou zobrazeny na obrázcích 4.2 a 4.1. Nejvyšší špičkové napětí bylo na vedení V413, kde hodnota dosáhla hodnoty téměř -1275 V. Na vedení V413 jsou hodnoty v rozmezí -1275 V až 565 V. Pro vedení V475 jsou hodnoty nižší, v rozmezí -290 V až 385 V. Důvodem velkého rozdílu hodnot vypočítaných na těchto vedeních je především jejich délka, která je pro vedení V413 více než dvojnásobná.



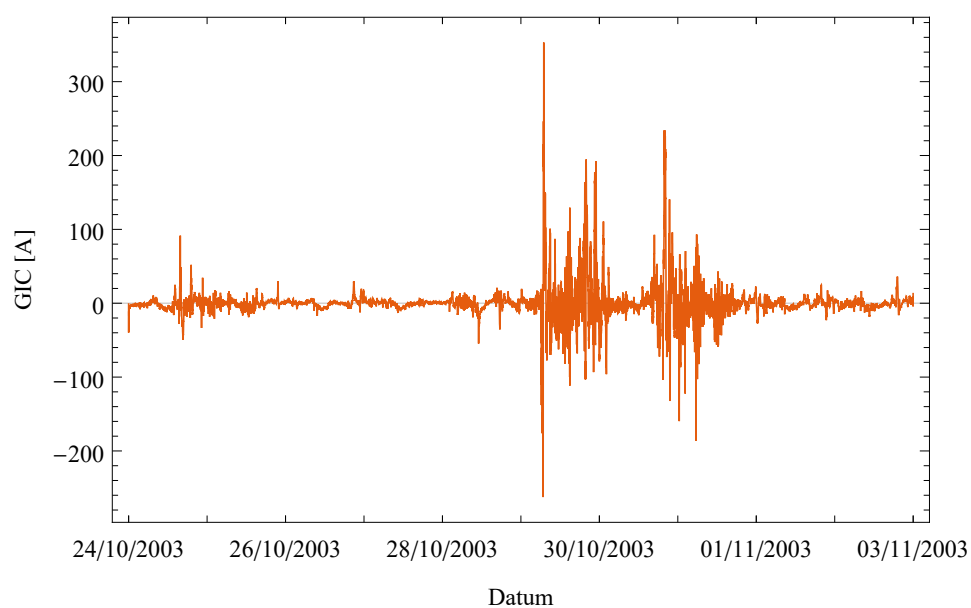
**Obrázek 4.1:** Průběh indukovaných napětí na vedení 475 v závislosti na čase.



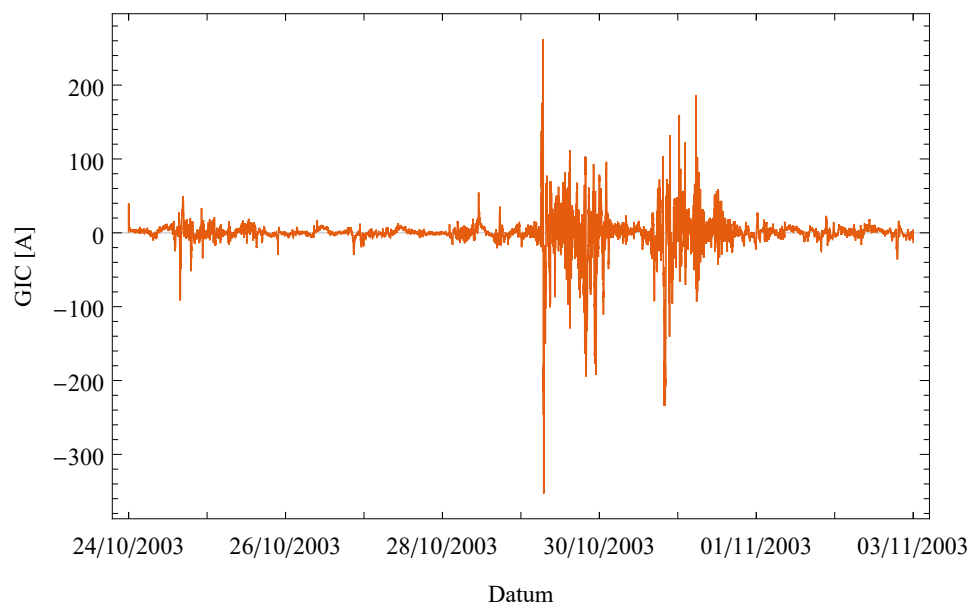
**Obrázek 4.2:** Průběh indukovaných napětí na vedení 413 v závislosti na čase.

Odpovídající GIC pro vedení 413 a uzly Řeporyje a Prosenice jsou uvedeny na obrázcích 4.6 a 4.5, pro vedení 475 a uzly Kočín a Řeporyje pak na obrázcích 4.4 a 4.3. Je zřejmé, že dvouuzlové přiblížení odpovídá uzavřenému elektrickému obvodu a proto jsou GIC v obou koncích vedení přesně v antikorrelaci. Z grafů je též patrné, že dvouuzlový přístup může posloužit pro řádový odhad očekávaných indukovaných proudů, ale přesnější průběhy z takového řešení očekávat nelze.

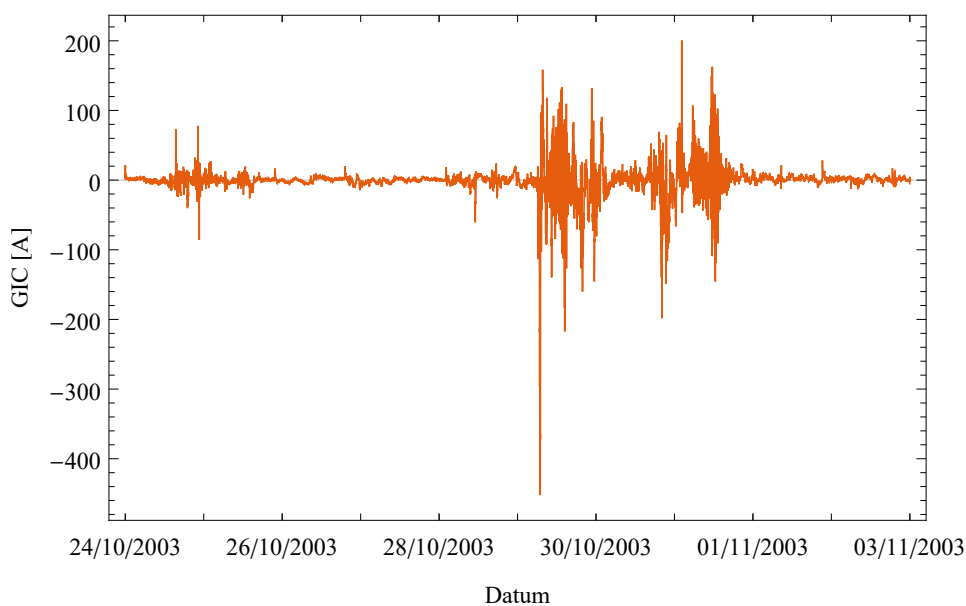




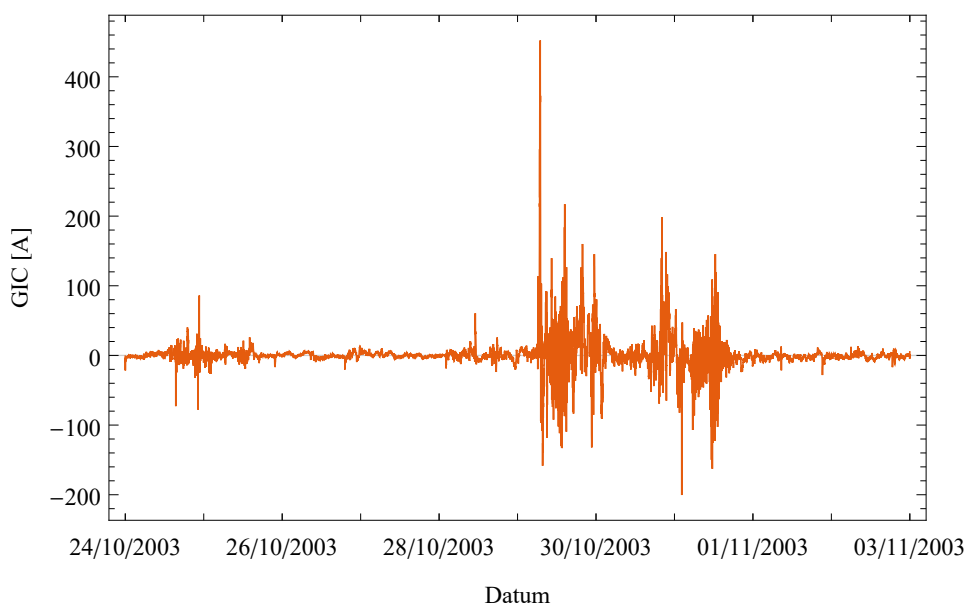
**Obrázek 4.3:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů na vedení 475 v závislosti na čase v rozvodně Kočín.



**Obrázek 4.4:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů na vedení 475 v závislosti na čase v rozvodně Řeporyje.



**Obrázek 4.5:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů na vedení 413 v závislosti na čase v rozvodně Řeporyje.

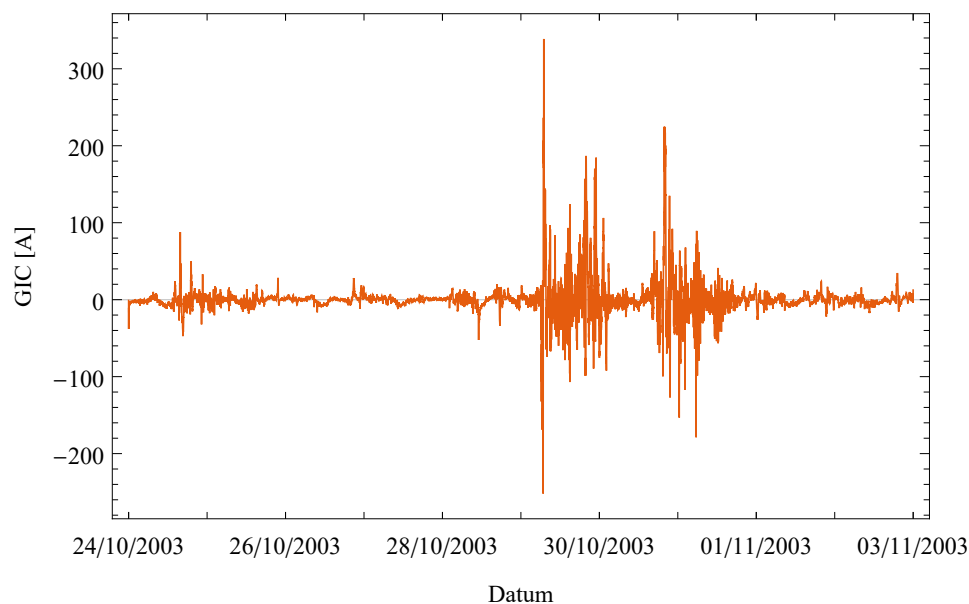


**Obrázek 4.6:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů na vedení 413 v závislosti na čase v rozvodně Prosenice.

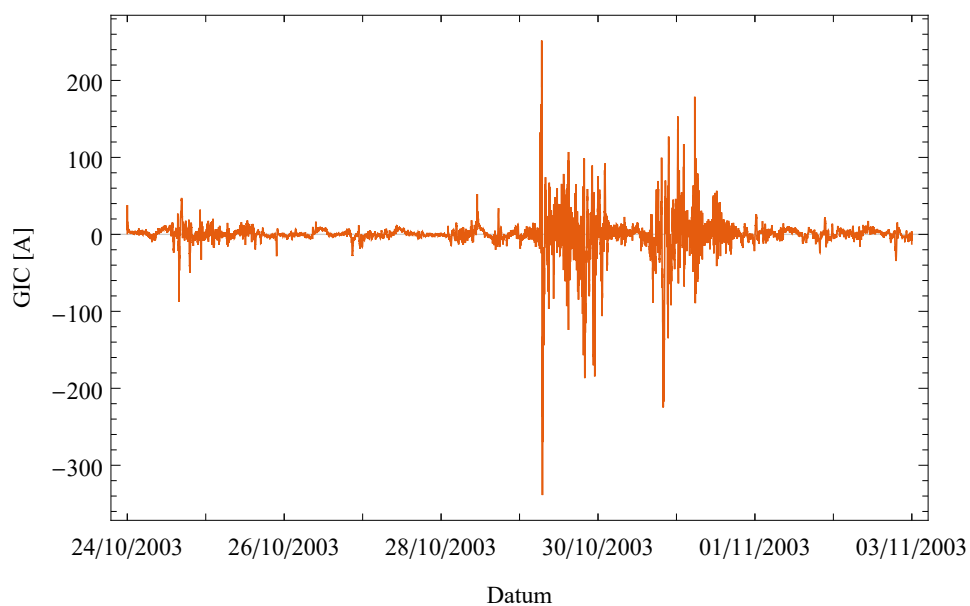
To je dobře patrné porovnáním obrázků 4.6 a 4.3, které oba reprezentují předpovědi indukovaných proudů v rozvodně Řeporyje, kde se obě vedení stýkají. Rozvodna Řeporyje je také rozvodnou pro vedení V412 a V414. Podle Kirchhoffových zákonů by součty proudů vtékajících do tohoto uzlu měly být rovny nule. V tomto případě ale vidíme rozdíly mezi těmito proudy a jde tedy říci, že v tomto případě je nutné počítat i s dalšími dvěma vedeními. K

tomuto výpočtu nám bohužel chybí parametry dalších dvou vedení, abychom mohli tuto platnost ověřit. Je tedy zřejmé, že dvouuzlové řešení má velmi orientační charakter, ale jeho praktická použitelnost je velmi omezená.

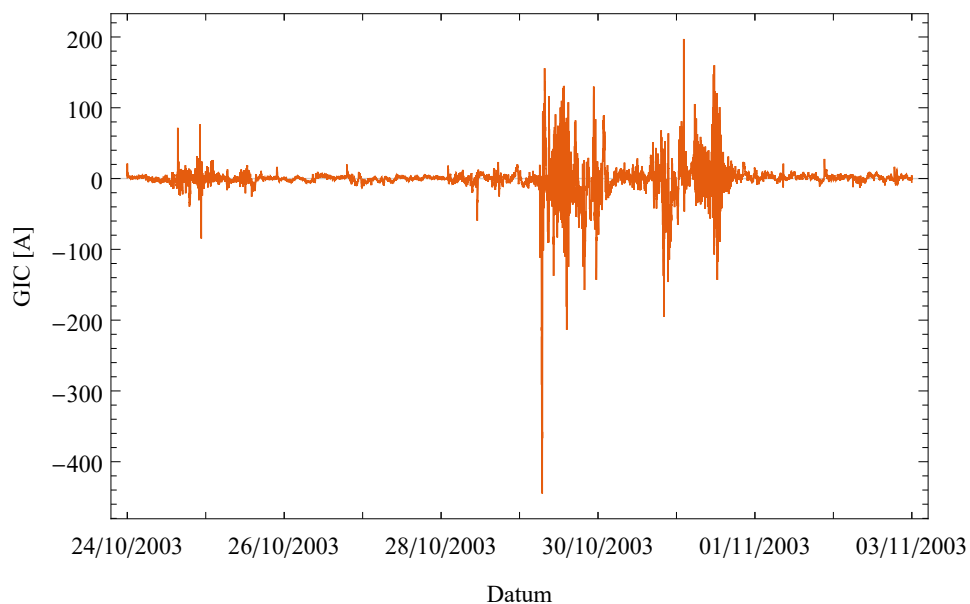
Jelikož mi nebyla během výpočtů známa hodnota zemnicího odporu rozvodny Řeporyje, byla nutnost tuto hodnotu odhadnout. Z parametrů dalších dvou rozvodů, kde mi tyto hodnoty byly známy, [24, 25] jsem udělala aritmetický průměr a vypočítala tak hodnoty pro  $0,054 \Omega$ . Tomuto odporu odpovídají výše znázorněné průběhy. Citlivost řešení na hodnotu neznámého uzemňovacího odporu jsem studovala zopakováním výpočtů pro další dvě vybrané hodnoty, a to sice  $0,1 \Omega$  a  $0,2 \Omega$ .



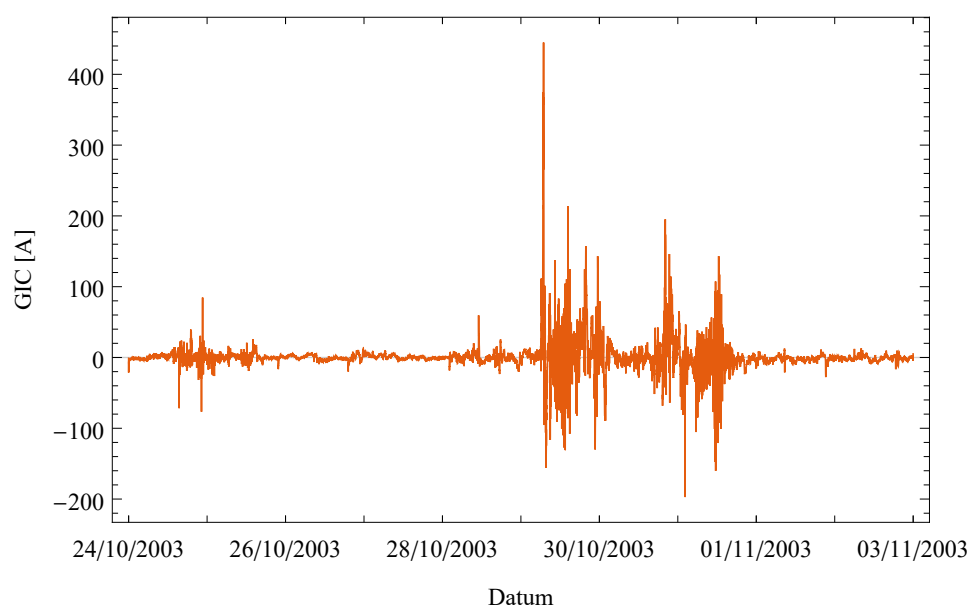
**Obrázek 4.7:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů na vedení 475 v závislosti na čase v rozvodně Kočín při hodnotě zemnicího odporu  $0,1 \Omega$ .



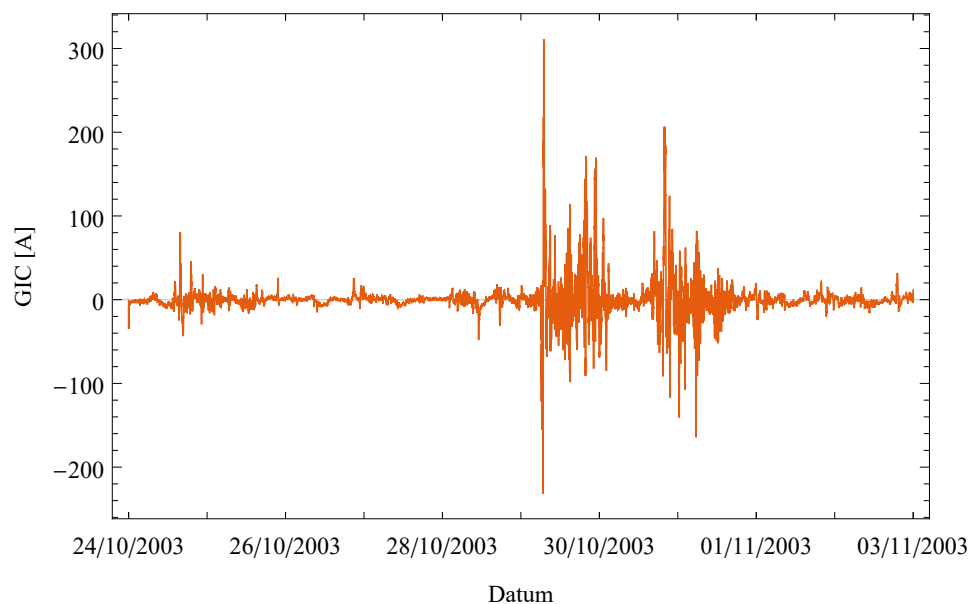
**Obrázek 4.8:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů na vedení 475 v závislosti na čase v rozvodně Řeporyje při hodnotě zemního odporu  $0,1 \Omega$ .



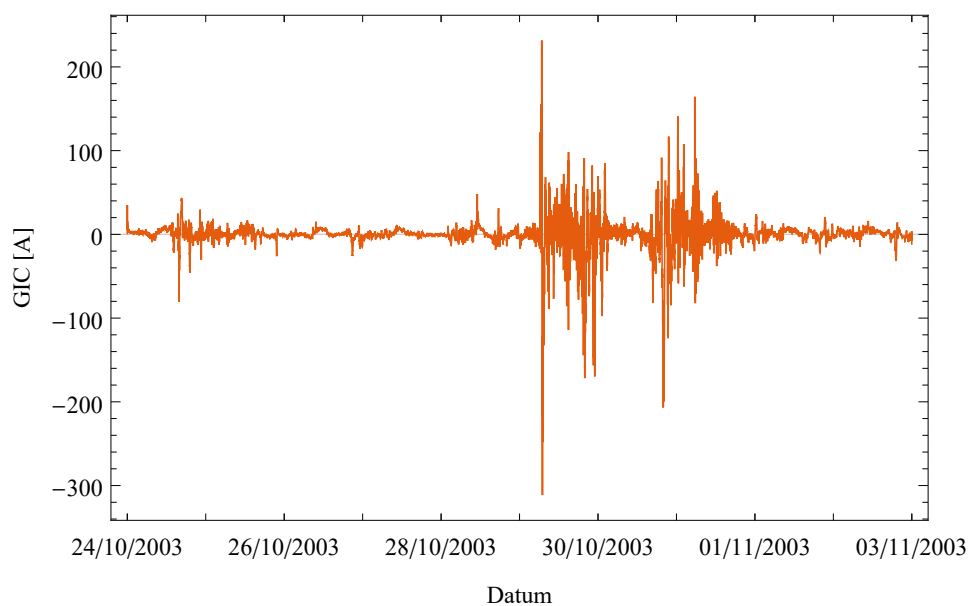
**Obrázek 4.9:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů na vedení 413 v závislosti na čase v rozvodně Řeporyje při hodnotě zemního odporu  $0,1 \Omega$ .



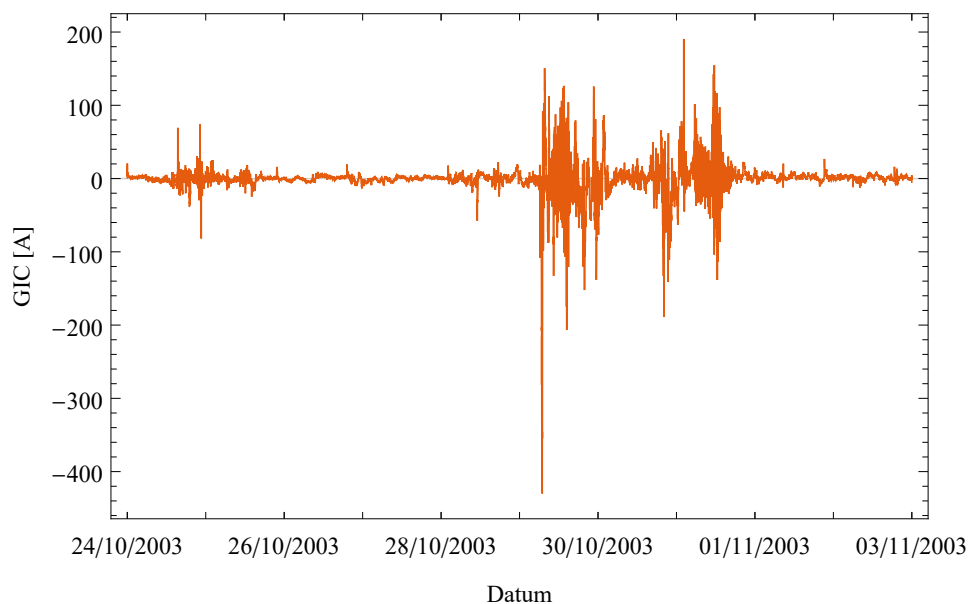
**Obrázek 4.10:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů na vedení 413 v závislosti na čase v rozvodně Prosenice při hodnotě zemního odporu  $0,1 \Omega$ .



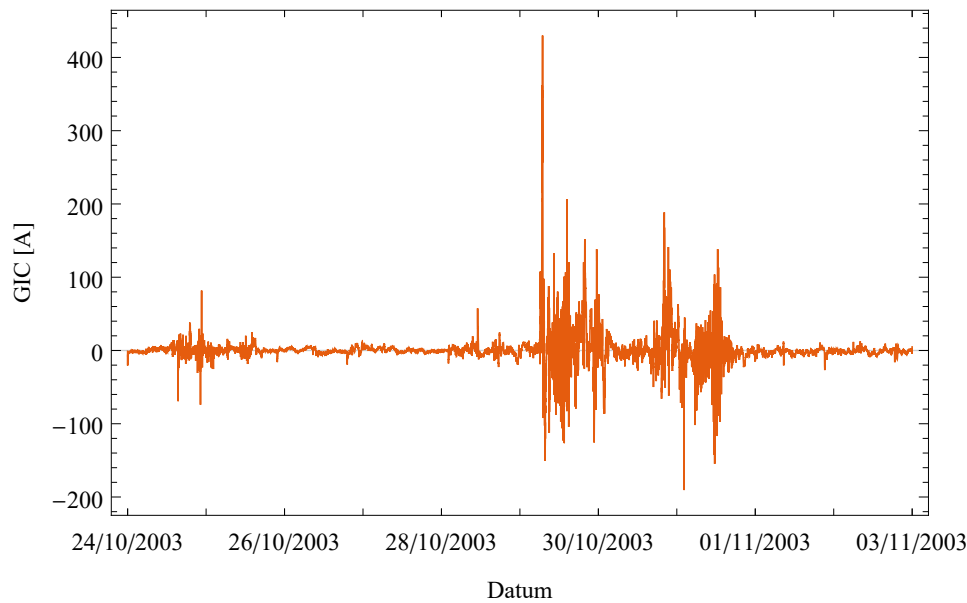
**Obrázek 4.11:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů na vedení 475 v závislosti na čase v rozvodně Kočín při hodnotě zemního odporu  $0,2 \Omega$ .



**Obrázek 4.12:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů na vedení 475 v závislosti na čase v rozvodně Řeporyje při hodnotě zemního odporu  $0,2 \Omega$ .



**Obrázek 4.13:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů na vedení 413 v závislosti na čase v rozvodně Řeporyje při hodnotě zemního odporu  $0,2 \Omega$ .



**Obrázek 4.14:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů na vedení 413 v závislosti na čase v rozvodně Prosenice při hodnotě zemnicího odporu  $0,2 \Omega$ .

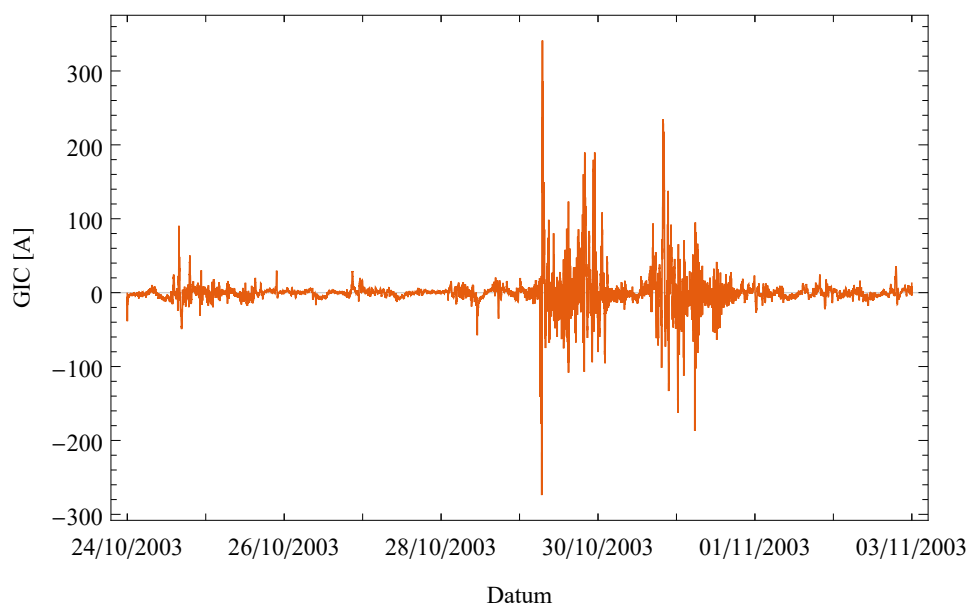
Z těchto výsledných hodnot a jejich průběhu je zřejmé, že tato hodnota zemnicího odporu nemá příliš velký vliv na velikost GIC na vedení. S rostoucím zemnicím odporem tyto proudy mírně klesají. Řádového poklesu vypočtených GIC dochází až pro hodnoty zemnicích odporů Ohmů.

## 4.2 Tříuzlové řešení

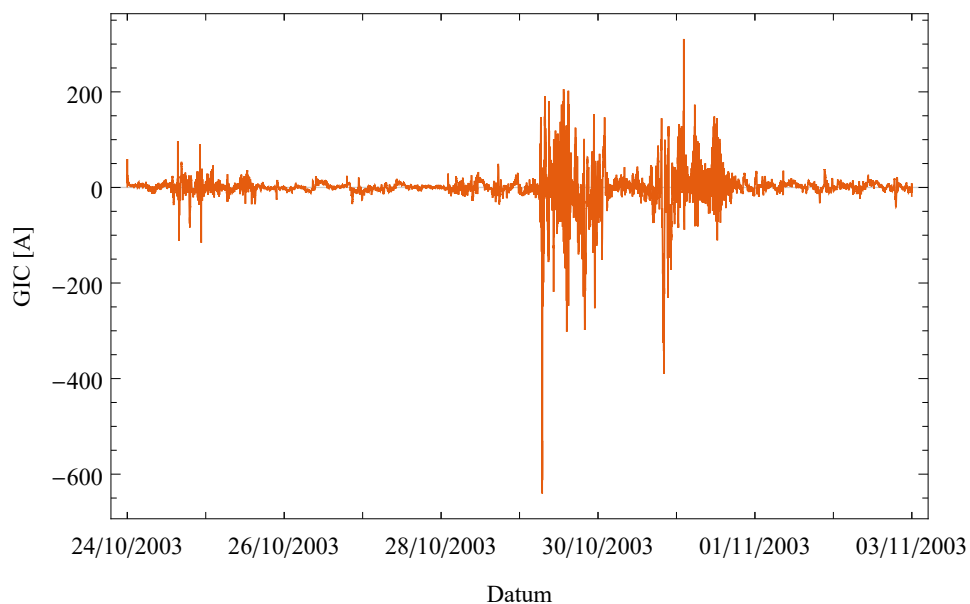
Motivována předchozím zjištěním jsem tedy zohlednila propojení obou vedení 413 i 475 v rozvodně Řeporyje a vypočetla řešení pro tříuzlovou topologii. Průběhy indukovaných napětí jsou i pro tříuzlové řešení pro jednotlivé úseky stejné, čtenář se tedy odkazuje na obrázky 4.2 a 4.1.

Velká změna je však patrná v průběhu geomagneticky indukovaných proudů, viz obrázky 4.15, 4.16 a 4.17. Z nich je patrné, že ve srovnání s dvouzlovým řešením jsou předpovězené amplitudy GIC pro krajní rozvodny, tedy Kočín a Prosenice mírně odlišné, nižší pro tříuzlové řešení, zatímco průběhy jsou stejné.

Porovnáním hodnoty GIC pro tříuzlové řešení v rozvodně v Řeporyjích, která je ve středu tohoto náhradního vedení a výpočtu pro dvouzlové vidíme, že hodnota pro dvouzlové řešení pro tříuzlové je jiná. V této rozvodně pravděpodobně dochází k tomu, že se hodnoty GIC sčítají a výsledné amplitudy tak závisí jak na proudu vedení V413, tak vedení V475.

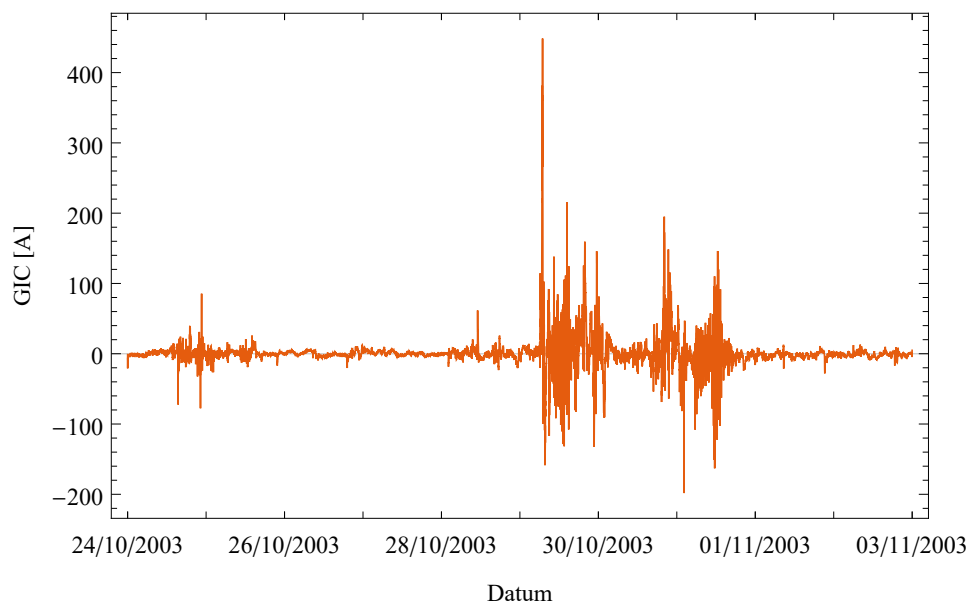


**Obrázek 4.15:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů v závislosti na čase pro tříuzlové řešení v rozvodně Kočín.



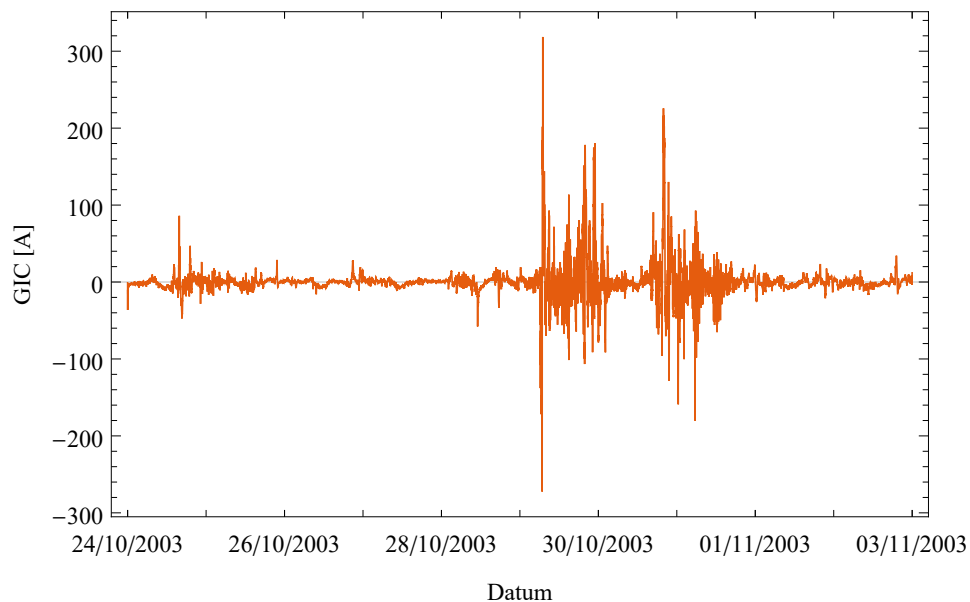
**Obrázek 4.16:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů v závislosti na čase pro tříuzlové řešení v rozvodně Řeporyje.



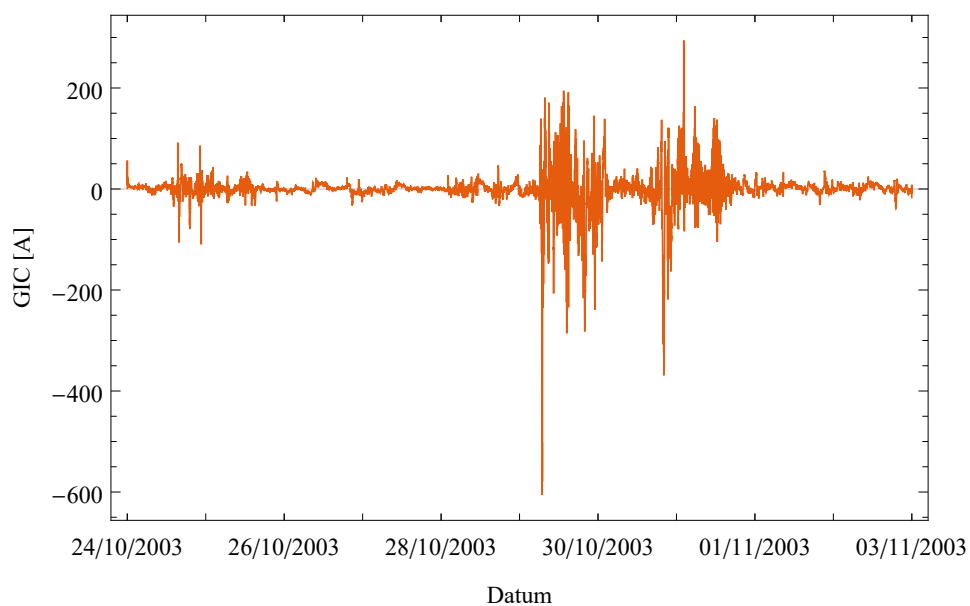


**Obrázek 4.17:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů v závislosti na čase pro tříuzlové řešení v rozvodně Prosenice.

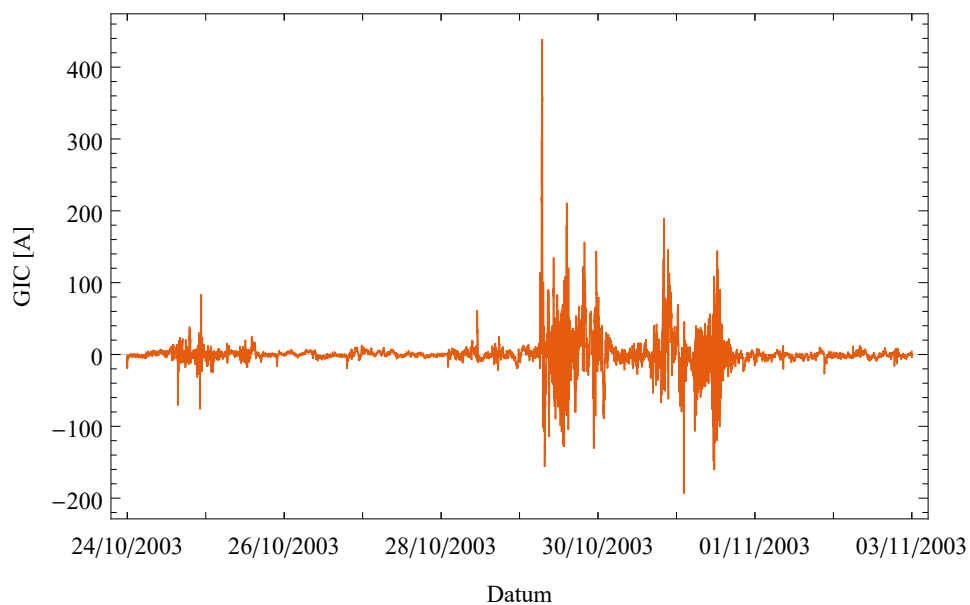
Pro porovnání jsem také provedla tyto výpočty pro různé hodnoty zemního odporu v Řeporyjích, a i zde je viditelné, že s rostoucím zemním odporem hodnota GIC mírně klesá.



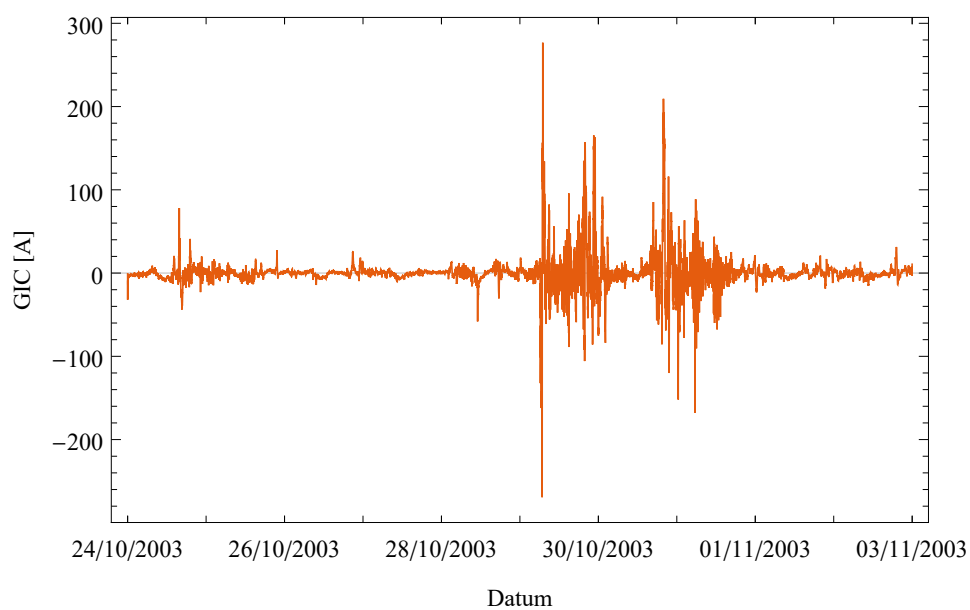
**Obrázek 4.18:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů v závislosti na čase pro tříuzlové řešení v rozvodně Kočín při hodnotě zemního odporu 0,1  $\Omega$ .



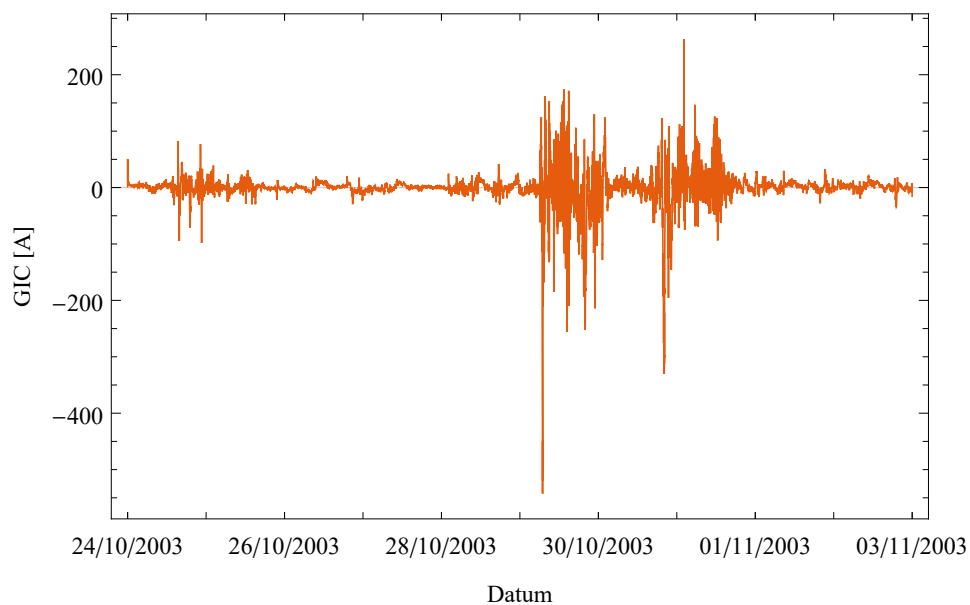
**Obrázek 4.19:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů v závislosti na čase pro tříúzkové řešení v rozvodně Řeporyje při hodnotě zemního odporu  $0,1 \Omega$ .



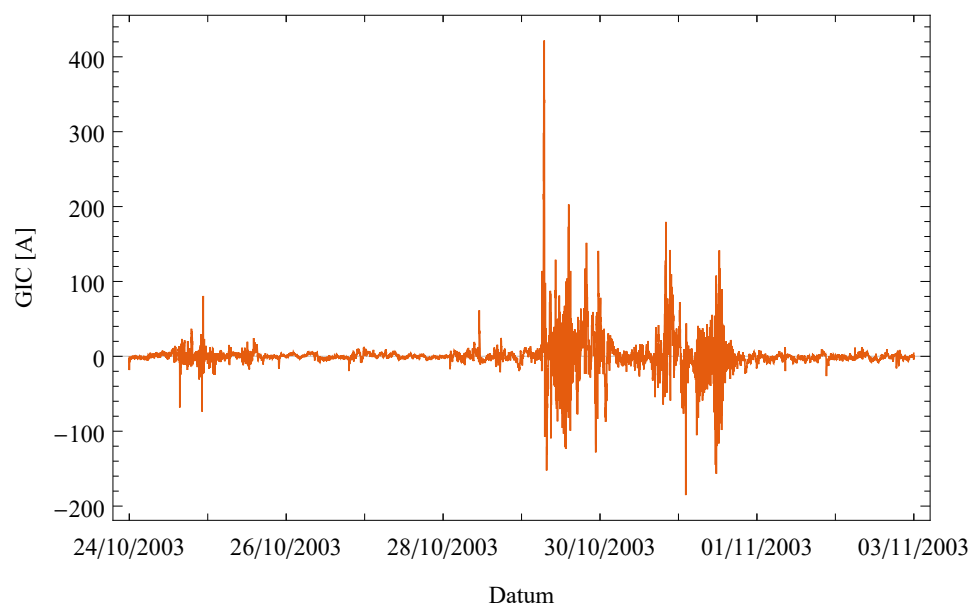
**Obrázek 4.20:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů v závislosti na čase pro tříúzkové řešení v rozvodně Prosenice při hodnotě zemního odporu  $0,1 \Omega$ .



**Obrázek 4.21:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů v závislosti na čase pro tříuzlové řešení v rozvodně Kočín při hodnotě zemního odporu  $0,2 \Omega$ .



**Obrázek 4.22:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů v závislosti na čase pro tříuzlové řešení v rozvodně Řeporyje při hodnotě zemního odporu  $0,2 \Omega$ .



**Obrázek 4.23:** Průběh geomagnetických indukovaných proudů v závislosti na čase pro tříuzlové řešení v rozvodně Prosenice při hodnotě zemního odporu  $0,2 \Omega$ .

## Kapitola 5

### Závěr

Provedenými výpočty pro dvě vedení, která mají společnou rozvodnu dvouuzlovou a tříuzlovou metodou jsem vypočítala hodnoty GIC, jejichž průběhy můžeme pozorovat v kapitole 4 Výsledky.

Důležitými parametry pro toto měření byly zemnicí odpory. Jelikož jsem během práce na této bakalářské práci nebyla schopna sehnat hodnotu zemnicího odporu pro rozvodnu v Řeporyjích, tuto hodnotu jsem volila odhadem a porovnávala také řešení pro několik hodnot. Výchozí hodnotou mi byly získané hodnoty odporu v Prosenicích a Kočíně, kde tyto odpory byly  $0,038 \Omega$  a  $0,071 \Omega$ . Zprůměrovala jsem tedy tyto hodnoty a pro výpočet použila hodnotu  $0,054 \Omega$ . Dalšími zvolenými hodnotami bylo  $0,1 \Omega$  a  $0,2 \Omega$ .

Nejvyšší hodnoty GIC ve všech částech vedení vyšly pro hodnotu nejnižší, tedy  $0,054 \Omega$ . Závěrem tedy můžeme říci, že hodnota GIC záleží na parametru rozvodny, jejich amplitudy klesají s rostoucím zemnicím odporem. Z hlediska snížení amplitud GIC se tedy jeví jako výhodnější zvýšení zemnicího odporu rozvodny. Zvyšování zemnicích odporů neutrálních bodů transformátorů je jedním z uvažovaných technologických opatření pro snížení citlivosti rozvodné sítě na výkyvy sluneční aktivity.

Vedení 413, které má délku 287,7 km a vede z rozvodny Řeporyje do rozvodny Prosenice, je nejdelší české vedení 400 kV, které je orientované od východu na západ. Pro toto vedení jsou výsledné elektromagnetické napětí při Halloweenké bouři v roce 2003 v rozmezí  $-1275 \text{ V}$  až  $565 \text{ V}$ . S ohledem na parametry vedení jsou výsledné geomagnetické indukované proudy v rozmezí  $+450 \text{ A}$  až  $-200 \text{ A}$ .

Vedení 475 má délku 137,5 km, vede také z rozvodny Řeporyje a druhá rozvodna tohoto vedení je v Kočíně. Toto vedení jsem vybrala z toho důvodu, že je to vedení, které je nejlépe orientovaným vedením sever-jih v České republice. Výsledné elektromagnetické napětí tohoto vedení mi vyšlo jako  $-290 \text{ V}$  až  $385 \text{ V}$ . Následně geomagnetické indukované proudy pro toto vedení vyšly v rozmezí  $+300 \text{ A}$  až  $-350 \text{ A}$ .

Pro vedení 475 jsou tedy hodnoty geomagnetických indukovaných proudů

menší, řádově jsou tyto hodnoty stejné, rozdíl není příliš velký. Předpokladem bylo, že pro delší vedení a vedení orientované sever–jih, by tyto proudy měly mít vyšší hodnoty. V tomto případě vedení 475 je více než dvakrát kratší a hodnoty jsou proto menší než pro vedení 413 i když je orientované sever–jih.

Jelikož jsme zvolili vedení, které mají společnou rozvodnu Řeporyje, bylo možné vypočítat také hodnoty GIC pro vedení Prosenice–Kočín. Pro tříuzlové vedení jsou výsledky ve třech grafech, který každý znázorňuje proudy v jednotlivých rozvodnách. Hodnoty GIC v těchto krajních rozvodnách jsou téměř totožné pro dvouuzlové a tříuzlové řešení, zatímco pro rozvodnu Řeporyje jsou tyto hodnoty odlišné. To je způsobeno tím, že proudy v tomto uzlu se sčítají. Vliv na proudy v rozvodně Řeporyje mají tedy obě vedení. Proudů v rozvodně Řeporyje jsou v rozsahu 450 A až –640 A.

Jelikož bohužel neznáme parametry transformátorů, tedy jejich jmenovité proudy, ochrany, parametry kabelů, nejsme schopni určit, zda mohou mít tyto hodnoty destruktivní účinky a mohou tak vést k blackoutu. Výsledkem mých výpočtů jsou GIC v řádu desítek, maximálně stovky ampér. To jsou hodnoty odpovídající spíše severským zemím.[26]

Ve srovnání s významně kompletnější studií provedenou pro sousední Rakousko [27] jsou GIC v mých výpočtech téměř řádově vyšší, práce zmiňuje dosahovaná maxima 50 A na vedení v severojižním směru. Tato maxima byla v Rakousku dosahována pro geoelektrické pole v řádu 1 V/km, zatímco elektrická pole, z nichž moje výpočty vycházela, a jež mi byla zadána, mají vrcholové hodnoty téměř pětkrát vyšší. Tyto rozdíly jsou zřejmě způsobeny jinými modely vodivosti Země, které do modelů geoelektrického pole vstupují. Zohledním-li tento rozpor již ve vstupních datech a přikloním-li se k amplitudách geoelektrického pole z blízkého Rakouska, byly by ojedinělé vrcholové hodnoty GIC dosahované ve studovaných vedeních 29. 10. 2003 kolem 100 A, jejich variance v období zvýšené aktivity by pak byla přibližně 10 A. To je v souladu s extrapolovanými odhady získané v rámci evropského projektu EURISGIC [26]. I to jsou však o řád větší hodnoty, než se v rozvodných sítích v České republice očekávaly ještě před několika málo roky.

Na stranu druhou, studie provedená pro území Itálie [28], tedy ještě jižněji, poukazuje na maximální výskyt GIC v hodnotách 100 A právě v období Haloweenských bouří, tedy ve stejném období, které jsem ve své práci studovala i já.

V severských zemích, kde se již několikrát vyskytly problémy se považují za nebezpečné již desítky ampér a stovky ampér mají prokazatelně destruktivní účinky. Tedy pro mnou vypočítané hodnoty proudů lze říci, že jsou tyto proudy i v naší zeměpisné šířce reálná hrozba. Jak jsem již v práci dříve zmínila, vystavení vedení GIC opakovaně může mít kumulativní vliv. Pokud bude tedy vedení vystaveno působení GIC, může dojít ke zrychlené degradaci

vedení a jejich komponent.

Závěry mé práce nejsou dostatečně průkazné a to z důvodu velmi omezené konfigurace studovaných vedení. Pro patřičné posouzení by bylo třeba vzít v úvahu všechna hlavní vedení přenosové soustavy. Metodologie výpočtů by byla naprosto stejná, pouze uvažovaných uzlů dokreslujících topologii by bylo více. Porovnání dvouuzlového a tříuzlového řešení ukazuje, že vypočtené GIC se v závislosti na modelu mění, ale tyto změny jsou menší než o řád. Řádovou změnu tedy čekat nelze. Slabinou výpočtu je také nutnost spoléhat na zadaný model geoelektrického pole, ale také na hodnoty zadaných impedancí vedení, a to zejména zemnicích odporů rozvoden, jejichž hodnoty se zdají být příliš nízké a není zcela zřejmé, zda dodané hodnoty skutečně reprezentují zemnicí odpor vedení. Metodologie však byla vypracována a prověřena a budou-li v budoucnosti získány potřebné údaje, nic nebrání přesnějšimu modelování amplitud GIC ve vedení české přenosové soustavy.





# Příloha A

## Literatura

- [1] Wikipedia, “Slunce.” <https://cs.wikipedia.org/wiki/Slunce>, 2019, dostupné 20.4.2019.
- [2] NASA, “What is solar activity?.” <https://www.nasa.gov/content/goddard/what-is-solar-activity/>, 2015, dostupné 20.4.2019.
- [3] Natural Resources Canada, “What is space weather?.” <http://www.spaceweather.gc.ca/sbg-en.php>, 2019, dostupné 20.4.2019.
- [4] Wikipedia, “Geomagnetic storm.” [https://en.wikipedia.org/wiki/Geomagnetic\\_storm](https://en.wikipedia.org/wiki/Geomagnetic_storm), 2019, dostupné 20.4.2019.
- [5] Wikipedia, “Geomagnetically induced current.” [https://en.wikipedia.org/wiki/Geomagnetically\\_induced\\_current](https://en.wikipedia.org/wiki/Geomagnetically_induced_current), 2019, dostupné 20.4.2019.
- [6] K. C. Fox, “Science nugget: Modeling extreme space weather.” [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/news/gic-model.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gic-model.html), 2012, dostupné 20.4.2019.
- [7] F. Cahyna, L. Haňka, and D. Klajbl, “Zvládli bychom geomagnetickou bouři?.” <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/fyzika-a-klasicka-energetika/2007-zvladli-bychom-geomagnetickou-bouri>, 2017, dostupné 24.4.2019.
- [8] J. E. Berge, *Impact of Geomagnetically Induced Currents on Power Transformers*. PhD thesis, University of Western Ontario, 2011.
- [9] T. E. Bell and T. Phillips, “A super solar flare.” [https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/06may\\_carringtonflare/](https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2008/06may_carringtonflare/), 2008, dostupné 23.4.2019.
- [10] Solar storms, “May 13, 1921 – The New York Railroad Storm.” <http://www.solarstorms.org/SS1921.html>, dostupné 24.4.2019.
- [11] S. Odenwald, “The Day the Sun Brought Darkness.” [https://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun\\_darkness.html](https://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun_darkness.html), 2009, dostupné 24.4.2019.



