

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Porovnání zatížitelností vodičů venkovních vedení

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martina MUŽÍKOVÁ**
Osobní číslo: **E13N0081P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Porovnání zatížitelností vodičů venkovních vedení**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

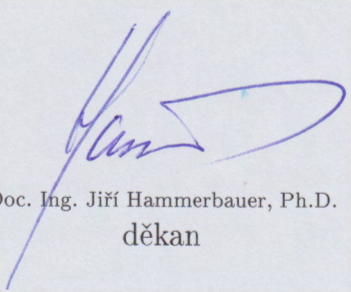
1. Zpracujte rešerši aktuálního stavu problematiky.
2. Vypracujte teoretické vztahy pro výpočet trvalé a dynamické zatížitelnosti vodičů venkovních vedení.
3. Navrhněte způsoby simulace dynamické zatížitelnosti vodičů.
4. Srovnejte výsledky výpočtů s měřením.
5. Navrhněte další zadání pro následující etapu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

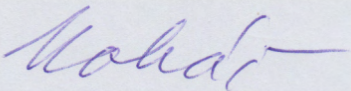
1. CIGRE J.W.G. B2.C1, Increasing Capacity of Overhead Transmission Lines: Needs and Solutions. CIGRE, 2010.
2. J. Tlustý, Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav. České vysoké učení technické v Praze, 2011.
3. CIGRE W.G. B2.12 and I.C. on Large Electric Systems, Guide for Selection of Weather Parameters for Bare Overhead Conductor Ratings. CIGRE, 2006.
4. VDI, VDI Heat Atlas, ser. Springer reference. Springer, 2010.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jaroslav Šnajdr**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku porovnání zatížitelností vodičů venkovních vedení. Nejprve jsou uvedeny metody pro zvýšení přenosové kapacity vedení. Dále se práce zabývá porovnáním holých a izolovaných vodičů z hlediska jejich oteplení při proudovém zatížení. Jsou zde vypracované teoretické vztahy pro výpočet tepelné bilance holého a izolovaného vodiče. Dalším bodem práce jsou výsledky ze simulací holého a izolovaného vodiče, které jsou provedeny v programu Comsol Multiphysics a následně porovnány se simulacemi v Matlab/Simulink.

Klíčová slova

Venkovní vedení, ampacita, tepelná bilance, holý vodič, izolovaný vodič

Abstract

The Master Thesis is focused on issue of comparison of overhead line conductor ampacity. At first there are described methods for increasing capacity overhead lines. The Thesis deals with comparison of bare and insulated conductors of overhead lines in terms of heating during their current load. There are described theoretical relations for calculating ampacity of bare and isolation conductors. Next parts of the thesis are results of simulations of bare an insulated conductors that are performed in the program Comsol Multiphysics and this results are compared with simulations in Matlab/Simulink.

Key words

Overhead line, ampacity, heat balance, bare conductor, insulated conductor

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 7.5.2015

Martina Mužíková

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Jaroslavu Šnajdrovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále děkuji všem rodinným příslušníkům za vytvoření příjemných podmínek při tvorbě práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	10
1 AKTUÁLNÍ STAV PROBLEMATIKY	11
2 ZVÝŠENÍ PŘENOSOVÉ SCHOPNOSTI VENKOVNÍHO VEDENÍ	13
2.1 METODY ZVYŠUJÍCÍ DOVOLENÝ PROTÉKAJÍCÍ PROUD.....	13
2.1.1 <i>Metody založené na vodičích</i>	13
2.1.2 <i>Operativní metody</i>	16
2.2 ŘEŠENÍ ZALOŽENÉ NA ZVÝŠENÍ NAPĚTÍ.....	21
2.3 ROZSÁHLÁ ŘEŠENÍ	21
2.3.1 <i>HSIL vedení</i>	21
2.3.2 <i>Konverze AC – DC</i>	23
2.4 ZHODNOCENÍ	24
3 TEORETICKÉ VZTAHY PRO VÝPOČET ZATÍŽITELNOSTI VODIČŮ	25
3.1 TEPELNÁ BILANCE VODIČE.....	25
3.1.1 <i>Ohřev vodiče způsobený průchodem proudu</i>	26
3.1.2 <i>Ohřev slunečním zářením</i>	26
3.1.3 <i>Ochlazení vodiče prouděním</i>	27
3.1.4 <i>Ochlazení vodiče sáláním</i>	31
3.1.5 <i>Chlazení odpařováním vody</i>	32
3.1.6 <i>Měrná tepelná kapacita vodiče</i>	32
3.2 TEPELNÁ BILANCE IZOLOVANÉHO VODIČE	33
4 NÁVRH ZPŮSOBŮ SIMULACE.....	35
4.1 POUŽITÉ VODIČE	35
4.1.1 <i>Holé vodiče</i>	35
4.1.2 <i>Izolované vodiče</i>	36
4.2 SIMULACE HOLÉHO VODIČE V USTÁLENÉM STAVU.....	37
4.2.1 <i>Výsledky simulace</i>	40
4.3 SIMULACE IZOLOVANÉHO VODIČE V USTÁLENÉM STAVU	43
4.4 SIMULACE HOLÉHO A IZOLOVANÉHO VODIČE V PŘECHODOVÉM STAVU	46
4.5 DYNAMICKÝ OHŘEV.....	48
ZÁVĚR	53
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	54

Seznam symbolů a zkratek

Gr	Grashofovo číslo [-]
g	Gravitační zrychlení [m/s^2]
c_c	Měrná tepelná kapacita [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
P	Výkon [W]
Pr	Prandtlovo číslo [-]
Nu	Nusseltovo číslo [-]
m_c	Hmotnost vodiče na 1 kilometr [kg/km]
D	Vnější průměr vodiče [m]
Re	Reynoldsovo číslo [-]
I	Proud [A]
U	Napětí [V]
α	Teplotní součinitel rezistivity [K^{-1}]
ε	Radiační vlastnost povrchu [-]
R_{DC}	Stejnoseměrný odpor lana [Ω]
R_{AC}	Střídavý odpor [Ω]
T_a	Okolní teplota [$^{\circ}\text{C}$]
T_{av}	Teplota vodiče [$^{\circ}\text{C}$]
k_{AC}	Koeficient zvyšující teplotu vlivem skinefektu [-]
K_{angle}	Faktor směru větru [-]
k_{AC}	Činitel povrchového jevu [-]
d	Průměr vnější vrstvy drátu [m]
R_f	Hrúbost povrchu vodiče [-]
S	Velikost plochy [m^2]
ε_s	Koeficient absorpce záření [-]
c	Měrné teplo vzduchu při konstantním tlaku [J/kgK]
μ	Dynamická viskozita vzduchu [kg/ms]
λ_f	Teplotní vodivost vzduchu [W/mK]
ν_f	Kinematická viskozita vzduchu [-]
V	Rychlost větru [m/s]
ρ_r	Relativní hustota vzduchu [-]
ρ	Hustota vzduchu v nadmořské výšce [-]

ρ_0	Hustota vzduchu na úrovni moře [-]
α_k	Koeficient přestupu tepla prouděním [$W/m^2.K$]
σ_B	Stefan- Boltzmanova konstanta [$W/m^2.K^4$]
a	Vzdálenost vodičů ve svazku [m]
σ	Solární absorpční koeficient [-]
I_s	Intenzita solárního záření [W/m^2]
$P_{\text{přir}}$	Přirozený výkon [W]
L	indukčnost [H]
Z_{vln}	Vlnová impedance [Ω]
L_p	Provozní indukčnost [H]
d_s	Vzdálenost mezi vodiči[m]
r_e	Ekvivalentní poloměr [m]
r	Skutečný poloměr [m]

Úvod

Předkládaná diplomová práce řeší problematiku přetěžování linek venkovního vedení. K přetěžování linek v České republice dochází z důvodu připojování neregulovatelných obnovitelných zdrojů do sítě. Jako příklad lze jmenovat Německo, kde dochází k postupnému odpojování jaderných elektráren a energie z již odpojených elektráren bývá nahrazována obnovitelnými zdroji (především větrnými elektrárnami). Dalším důvodem je rostoucí poptávka po energii v jižních zemích (například Itálie). Vzniká tak problém s přetížitelností vedení a je nutné hledat způsoby pro její zvýšení.

V první části práce se zabývám metodami pro zvyšování kapacity vedení. Metody jsou rozděleny dle zvýšení přenášeného výkonu na zvýšení napětí, zvýšení dovoleného procházejícího proudu a na rozsáhlá řešení. Metoda zvýšení dovoleného procházejícího proudu zahrnuje operativní metody, které patří mezi nejlevnější řešení zvyšování přenosové kapacity, protože jsou v tomto případě využity stávající linky na maximum. Tyto metody spočívají v zaznamenávání okolních podmínek, které ovlivňují oteplení vodičů, a tedy i proud procházející vodiči. Sledování teploty vodičů lze dosáhnout metodou real-time monitoring, která je schopna zaznamenávat teplotu vodiče a také jeho průvės.

V další části práce jsou vypracovány teoretické vztahy pro tepelnou bilanci holého a izolovaného vodiče. Následuje simulace metodou FEM v programu Comsol Multiphysics, která je na popsané bilanci založena. Výsledkem simulace je průběh oteplení holého a izolovaného vodiče, které je následně porovnáno se simulacemi v Matlab/Simulink. Simulace jsou provedeny pro ustálený a přechodný stav. V poslední části práce je porovnán výsledek simulace s měřenými hodnotami reálného vodiče.

1 Aktuální stav problematiky

V posledních letech došlo k výstavbám a připojováním alternativních zdrojů, přibýlo obnovitelných zdrojů elektrické energie (OZE), fotovoltaických a větrných elektráren. Největší nárůst byl zaznamenán u fotovoltaických elektráren, kdy finanční investoři využili podpory ve formě garantované výkupní ceny elektrické energie. Distribuční soustava na to však nebyla připravena. Tato soustava byla stavěna na jednosměrný tok elektrické energie a v malé míře přijímala pouze výrobu energie z malých vodních elektráren a dalších podobně malých zdrojů. Tento „boom“ v připojování obnovitelných zdrojů musel být zastaven společností ČEPS a.s. Dne 3. února 2010 byly distribuční společnosti (ČEZ, E. ON, PRE) požádány společností ČEPS a.s. o pozastavení připojení nových větrných a fotovoltaických elektráren. Důvodem bylo překročení bezpečného limitu výkonu instalovaných a již odsouhlasených obnovitelných zdrojů k připojení do elektrizační soustavy České republiky. Pokud by bylo připojeno ještě více výrobních zdrojů, mohl by být ohrožen bezpečný a spolehlivý provoz ES. Překročením bezpečného limitu by mohlo být vyžádáno odstavení větrných a fotovoltaických elektráren, které byly v provozu. [12][2]

V sousedních zemích, převážně v Německu, je větší počet větrných elektráren, které dodávají elektrickou energii nerovnoměrně v závislosti na povětrnostních podmínkách. Vzniká pak problém s přetoky elektrické energie do elektrizační soustavy ČR. To má za následek přetížení vedení přenosové soustavy. Dalším důvodem přetížení linek je přenos elektrické energie přes území ČR do Itálie, která není schopna zabezpečit dodávku elektrické energie vlastními zdroji. [2]

Vlivem připojení OZE a zároveň neprobíhající výstavbou nových linek dochází k přetěžování venkovních vedení. Již se investovalo do rekonstrukce rozveden přenosové soustavy a modernizace sítě 220 kV. Rekonstrukce sítě 220 kV by měla být v blízké době postupně dokončena. Společnost ČEPS a.s. plánuje také rekonstrukci a obnovu sítí 400 kV. Konkrétně 4 nových rozveden a tedy 600 km nových vedení. Cena výstavby zahrnuje cenu zařízení a cenu montážních prací. Cena kilometru vedení se pohybuje u linek 400 kV v rozmezí 10 až 20 milionů korun v závislosti na tom, o jaký typ vedení se jedná a na členitosti terénu. [13]

Dochází-li k obnově zařízení, musí se průběžně sledovat, kontrolovat a monitorovat jeho stav. Cílem je maximální využití stávajících zařízení a zároveň zachování bezpečnosti provozu přenosové soustavy. Samozřejmě se vychází z technické životnosti zařízení. Stav se dále posuzuje dle různých kontrol, studií a měření. V posledních desítkách let nastal výrazný technologický pokrok. Zvláště v zařízení rozvodu přenosové soustavy (přístroje, systémy chránění zařízení, měření, monitoring a komunikace). [2]

Dalším důvodem obnovy ES je zvyšující se spotřeba elektrické energie. V důsledku problémů spojených s výstavbou venkovních vedení, je třeba zkoumat možnosti zvýšení přenosové kapacity na současných sítích a je také důležité maximálně využít stávající systémy pro její zvýšení.

2 Zvýšení přenosové schopnosti venkovního vedení

Přenosová schopnost vedení, jinak nazývána také ampacita, je dovolené zatížení vodiče, dané maximálním proudem, který může vodič přenést, aniž by došlo k jeho porušení. Ampacita je ovlivněna především tepelným stavem vodičů. Porušení vodiče je dáno maximální dovolenou teplotou. Přenosová schopnost je závislá na elektrických a mechanických vlastnostech materiálu vodičů, tepelných vlastnostech izolací (u kabelů) a schopnosti rozptýlení tepla uvnitř vodiče závisující na geometrii vodiče a jeho okolí. V závislosti na teplotě se mění průhyb vodiče a teplota je ovlivněna klimatickými podmínkami (teplota vzduchu, vlhkost atd.). [3]

Metody pro zvýšení přenášeného výkonu jsou následující:

- Zvýšení napětí
- Zvýšení dovoleného protékajícího proudu
- Rozsáhlá řešení (HSIL vedení, konverze AC-DC)

2.1 Metody zvyšující dovolený protékající proud

2.1.1 Metody založené na vodičích

Metody hledají způsob přenosu proudu překračující současný limit přenosové kapacity vedení. Stávající vodiče se nahrazují novými vodiči, které mají vyšší přenosovou kapacitu nebo zkouší posunout hranice tepelného limitu vodiče. Existuje mnoho druhů vodičů, jejichž vlastnosti mohou mít velký vliv na přenosovou schopnost vedení. Volba vodiče pro venkovní vedení je závislá jak na ceně, tak na provozní bezpečnosti, neboť přetržení vodiče může způsobit problémy s dodávkou elektrické energie. Při výběru je zohledněna také ztrátová energie a úbytky napětí vodičů. Na vodiče jsou kladeny požadavky, mezi které patří pevnost, odolnost proti chemickým vlivům, odolnost proti povětrnostním podmínkám a chvění, odolnost proti poškození při montáži a malé ztráty pevnosti při oteplení. Existuje několik možností zvýšení přenosové kapacity: nová vedení, zachování vodičů a změna vodiče.[1]

Nová vedení

Nahrazení vodiče za nový je velice drahá záležitost. Jedná-li se o nové vedení, mezi možnostmi patří připojení další linky nebo vytvoření nové konstrukce. Nevýhodou této metody je však nedostatek místa pro výstavbu nových linek a doba výstavby.[1]

Zachování vodičů

V případě nedostatku financí na výměnu vedení či vodiče, se volí metoda pro zvýšení zatížitelnosti - zachování vodičů. Tato metoda spočívá ve zvýšení provozní teploty na svoji horní hranici. Nutná podmínka pro zvýšení ampacity při zachování vodičů, je zvýšení teploty k novému hornímu limitu. To má za následek zvýšení prověšení a snížení výšky vodiče vůči zemi. Požaduje se plné využití tepelné kapacity vodiče. Dalším požadavkem je, aby tepelná kapacita vodiče určovala přenosovou kapacitu vedení více, než impedance vedení. To je důvodem, proč je tato metoda užitečná pouze na kratší linky a linky s nižším napětím – obvykle pod 300 kV. Náklady na uchování vodiče jsou minimalizovány velmi malou změnou konstrukce vedení. Konstrukce vedení se musí zvýšit kvůli většímu prověšení vodiče, kterého se dosáhne zvýšením teploty. Náklady na zvýšení konstrukce jsou rozdílné dle typu daného zařízení. Dřevěné nebo betonové sloupy jsou poměrně levné a snadno vyměnitelné za vyšší konstrukce. [1]

Změna vodiče

Změna vodiče je výhodná, pokud má linka rezervy ve svých konstrukcích. To znamená, zda je schopna unést větší a těžší vodič. Metoda je vhodná, pokud je potřeba zvýšení zatížitelnosti za nízkou cenu. V případě, že vodič nabízí výrazné zvýšení tepelného limitu a zvýšení proudové zatížitelnosti během zachování počáteční konstrukce, jsou vodiče podstatně dražší než standardní. Z tohoto důvodu je možné nahradit stávající vodič standardním vodičem o větším průřezu za předpokladu, že existují vodiče, které jsou schopny znatelně většího tepelného zatížení. Pokud je změna vodiče stávající linky možná, jsou vodiče nahrazovány následujícími speciálními vodiči: [1]

- **Celohliníkové** - AAC (All Aluminum Conductor) a AAAC (All Aluminum Alloy Conductor). Slitinou vodiče je tepelně ošetřený hořčík – křemík –

hliník. Teplota celohliníkových lan může dosahovat až 100 °C. Celohliníkové vodiče mají dobrou antikorozi ochranu, nepřítomnost ocelového jádra odstraňuje galvanickou korozi, která vzniká u lan AlFe. [4]

- **Vodiče se zesílenou hliníkovou slitinou** - ACAR (Aluminum Conductor Alloy Reinforced). Tento vodič kombinuje prvky z vodiče AAAC a elektrovedného hliníku. Zvýším-li množství elektrovedného hliníku, zvýší se tím vodivost vodiče, ale sníží se pevnost a naopak. Vodič může být tvořen tzv. mozaikou ve tvaru Z, vodiče pak mají větší hliníkovou část a zvýšenou hustotu lana. Tím je ve vodiči menší odpor než u vodiče kruhového průřezu a také je zde dosažena o 11-16 % vyšší přenosová schopnost vodiče. [4]
- **Vysokoteplotní vodiče** - TACSR (Thermal Resistant Aluminum Alloy Conductors Steel Reinforced), GTACSR (Gap Type Thermal-resistant Aluminum Alloy Conductor Steel Reinforced)) a ACSS (Aluminum Conductor Steel Supported). Vysokoteplotní vodiče umožní svými materiálovými a konstrukčními schopnostmi provoz i při vysokých teplotách. Vodiče TACSR jsou stejně slaňované jako vodiče ACSR. ACSS vodiče jsou klasického kruhového průřezu vyrobené z hliníkových vodičů. GTACSR se konstrukcí velice podobá klasickému vodiči ACSR. Vodiče mají jádro složené z galvanizované oceli, plášť složen ze speciálně odolné slitiny zvané TAL. Tato slitina má větší vodivost než obyčejný hliník. Tyto vysokoteplotní vodiče se používají pro místa, kde je potřeba zvýšení ampacity. Největší výhodou TAL slitiny je, že se nežihá do 150 °C. Povolená teplota pro ACSR lana je do 80 °C. [4]

2.1.2 Operativní metody

Tyto metody hledají způsob častějšího využití rezervního výkonu existujícího vedení bez fyzické změny vedení. Dynamický rating vedení se neustále mění. To je způsobeno mnoha faktory, mezi které patří měnící se počasí a proud protékající vodičem. Do operativních metod pro zvýšení zatížitelnosti vodičů venkovních vedení se řadí:

- Pravděpodobnostní metody
- Real-time monitoring

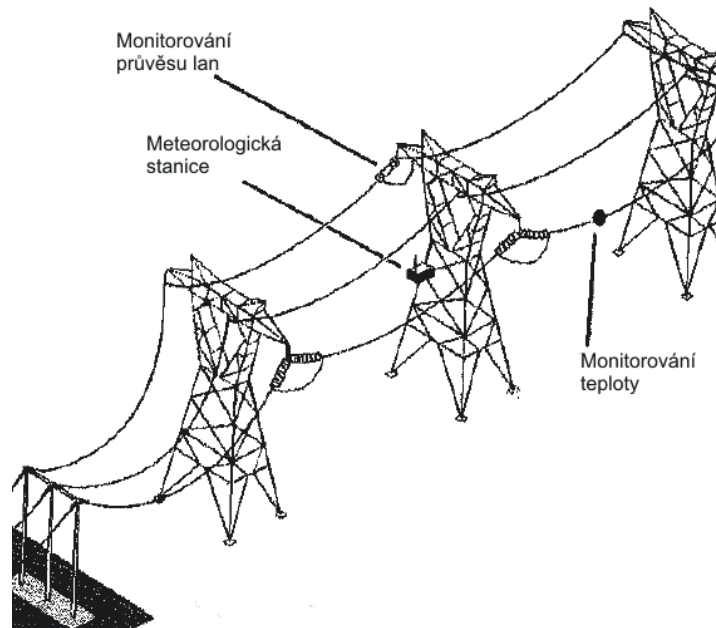
Statický rating

K určení statické ampacity se nevyžaduje meteorologické monitorování ani instalace senzorů na venkovní vedení. Měření využívající statické ampacity je prováděno na základě historických statistik o počasí v daném regionu. Jsou stanovena různá zatížení pro dané roční období (letní, zimní). [4]

Dynamický rating

Dynamický rating je měření, které zvyšuje využitelnost ampacity venkovního vedení v závislosti na aktuálních podmínkách počasí a zatížení vodiče. Dynamický rating umožňuje obdržení reálných informací o tepelných stavech linek venkovních vedení a operátoři poté mohou korigovat dodávku elektrické energie. Výsledkem rovnoměrné dodávky elektřiny může být možnost přenosu většího výkonu za menší náklady. [14]

Dynamický rating je vyhodnocován na základě průběžných dat o počasí a také metodami řešení real-time monitoringu (viz obr. 2.1). Pokud jde o počasí daného regionu, je považováno jako předpověď ampacity vedení na několik hodin dopředu. [9]



Obr. 2.1: Venkovní vedení s řešeními real-time monitoringu [14]

Pro dynamický rating vedení mohou být použity teploty vodičů. Mezi základní otázky patří způsoby, jakými lze získat teplotu, jejíž přesnost je nezbytná, a který monitorovací systém je nejvhodnější z ekonomického hlediska. Instalace monitorovacích systémů byla založena na Německých TSO (Transmission System Operator). První systém je založen přímo na měření teploty vodiče pomocí dvou pasivních čidel (SAW senzor) měřících akustickou vlnu na povrchu. Druhý systém je založen na nepřímé metodě, využívající tepelný model pro výpočet teploty vodiče při zohlednění podmínek počasí. V tomto případě je meteorologická stanice umístěna v blízkosti vodiče.[9]

Náklady na monitorovací systémy a technické úsilí byly poměrně vysoké. Vezmeme-li v úvahu aktuální náklady na měřicí zařízení, úsilí o jejich instalaci a nezbytné výpadky linky během instalace těchto systémů v rámci celé sítě je toto úsilí velmi neekonomické. Aplikace meteorologických stanic na lokálních stanicích nevyžaduje odpojení vedení a náklady na instalaci jsou výrazně menší. Nicméně stále zůstává nutnost vybavit všechny linky meteorologickými stanicemi. Nejjednodušším řešením je využít již dostupných stanic, které jsou umístěny v blízkosti sledované linky a zde promítat naměřené meteorologické podmínky na lince. Tento pilotní projekt byl rozšířen o další nepřímou metodu (vzdálená stanice), která počítá s teplotou vodiče užitím komerčně dostupných meteorologických dat. Cílem projektu je stanovit přiměřenou teplotu vodiče

z meteorologických údajů, zajistit místní a vzdálené meteorologické stanice a najít nejvhodnější systém z ekonomického hlediska. [9]

Pravděpodobnostní metody a real-time monitoring jsou metody, které se používají ke zvýšení zatížitelnosti vedení za rozumné náklady. Pokud tedy nastane případ, že je rezerva výkonu k dispozici, tyto metody umožní rychle zvýšit výkon.[1]

2.1.2.1 Pravděpodobnostní metody

Metoda je založena na pravděpodobnostních modelech, které vychází z proudového zatížení linky v jednotlivých časových obdobích během roku. Jsou známy aktuální data vedení (rychlost a směr větru, sluneční záření a okolní teplota) pro určitý den v roce. V dalším období se pak předpokládá stejné nebo alespoň podobné zatížení vodiče.[1]

2.1.2.2 Real-time monitoring

Monitoring v reálném čase může být založen na mechanickém napětí, průvěsu nebo teplotě jádra vodičů. Účelem monitorovacího zařízení je optimalizace zatížitelnosti současných vedení. Systém musí brát v úvahu, že přenos výkonu linkou může být omezován stabilitou sítě, tepelnými a napěťovými omezeními. Jedná-li se o tepelné omezení, je proudový rating omezen průvěsem nebo teplotou žhánání vodičů.[1]

Pro lepší účinnost využití údajů, které jsou zaznamenány monitorovacím zařízením, musí být údaje odeslány včas do řídicího centra, vhodně analyzovány a být srozumitelně předloženy operátorovi.

Možnost zvýšení přenosové kapacity v real-time monitoring systémech

Průměrný zisk ampacity může být odhadován z rozdílu mezi okolní teplotou a teplotou konstrukce vedení (např. 35°C) a průměrnou teplotou okolí v regionu (např. 10°C). Průměrné zvýšení termálního ratingu na vedení s využitím real-time systému je asi 10 -15%. Pokud se zvyšuje ampacita vedení, je důležité zkontrolovat všechny součásti obvodu, které jsou dimenzované pro vyšší ampacitu, a pokud je to nutné, vyměnit potřebné součásti jako jsou např. jističe, proudové transformátory, přípojnice a svorky. Dále může být kontrolováno magnetické pole, které se zvyšuje s nárůstem ampacity.[1]

Přibližné náklady

Cena monitorovacího vybavení zahrnuje zařízení, jejich instalaci a integraci do vyhodnocovacího procesu a bezpečný přenos dat. V některých případech musí být zahrnuty i náklady na změnu ochranných prostředků linky. Náklady na samotné monitorovací zařízení jsou rozumné, ale významnou položkou v celkovém rozpočtu je telekomunikace: informace musí být zaslány do vysílacího centra ve skutečném čase a v použitelné formě. V porovnání s rekonstrukcí nebo úpravou linky jsou náklady na toto řešení nízké.[1]

Klasifikace dle zařízení:

Stávající řešení pro real-time monitoring jsou klasifikovány podle principu, na němž jsou založeny:

- měření teploty vodiče,
- měření mechanického napětí,
- sledování umístění bodů na vodiči,
- vibrační analýza
- měření vodiče v závislosti na aktuálním stavu počasí.

Měření teploty vodiče

Tento systém je založen na měření teploty lokálně, tedy přímo na vodiči senzorem (viz obr. 2.2) nebo optickými vlákny. Řešení pomocí optických vláken zaznamená hodnotu teploty vodiče po celé délce vedení.



Obr. 2.2: Monitoring teploty [1]

Měření mechanického napětí

Existuje několik řešení, na kterých je monitoring založen. Jednou z metod je řešení založené na měření mechanického napětí, kdy se siloměr nachází na uzemněném konci izolátoru a kotevním bodu stožáru. Poblíž umístění siloměru je nainstalována meteorologická stanice za účelem zhodnocení místního slunečního záření a rychlosti větru, jakožto i teploty vzduchu. Cílem systému je odvození prověšení vodiče a jeho závislost na okolních podmínkách.[1]

Sledování umístění bodů na vodiči

Dalším řešením je sledování polohy bodů na vodiči. Systémy zde používají diferenciální GPS, lasery, kamery, radary nebo měření sonarem. Cílem těchto zařízení je sledovat bod na vodiči v případě, že je nízká viditelnost nebo vodič vibruje, tím se zjistí prověšení vodiče.[1]

Vibrační analýza

Tento typ zařízení může být nainstalován kdekoliv na venkovním vedení, spoléhá na fakt, že frekvence kmitání je spojena s prověšením. Ve své podstatě zahrnuje účinek na průvěsu vliv všech místních podmínek, jakou jsou rychlost větru, sluneční záření, teplota, zatížení vodiče, dotvarování v případě přítomnosti ledu nebo sněhu, které mají vliv na průvěs bez přímého měření. Senzor je napájen indukci a ke své funkci nepotřebuje žádné informace o vedení. Výsledná hodnota prověšení je určena z frekvence vibrací.[1]

Měření vodiče v závislosti na aktuálním stavu počasí

Online monitoringem je sledována ampacita vedení. Monitoring je založen na tepelné bilanci vodiče a může být vyhodnocován na základě meteorologických podmínek (rychlost větru, úhel dopadajícího větru na vedení, teplota okolí) uvažujících vliv na teplotu vodiče. Díky této metodě a výpočetním prostředkům je možnost on-line (real-time) měřit maximální bezpečný proud, kterým je možné vedení zatížit. Tím se může využít linka na maximum. Vzhledem k tomu, že je linka dimenzována výkonovou rezervou je možné často zvyšovat dovolený procházející proud vodičem na základě aktuálních podmínek počasí. [1]

2.2 Řešení založené na zvýšení napětí

Velmi účinný způsob zvýšení přenosové kapacity je provoz venkovního vedení na vyšší napěťové hladině. Ačkoli zvýšení proudu zvýší ampacitu v průměru málo, přechodem na vyšší hladinu napětí se zvýší ampacita přímým poměrem změny napětí. Většinou bývají změny napětí dvakrát někdy i vícekrát větší, tím dochází k velkému zvýšení přenosové kapacity. Průměr vodiče může omezovat zvyšování napětí. To může mít za následek nutné nahrazení stávajících vodičů za nové a zároveň zvýšení napětí z důvodu korónového výboje. Nevýhodou zvýšení napětí je fakt, že dojde k zániknutí obvodu nižšího napětí. Tím mohou vzniknout problémy v síti, které musí být vyřešeny jinými způsoby. Např. na hladině vn se provádí regulace napětí přepínáním odboček transformátoru na straně vvn. Další nevýhodou je dlouhá doba realizace, která není vždy akceptovatelná.[1]

Ačkoli v některých případech je levnější výstavba nové linky než zvyšování napětí, pořád jsou zde výhody rekonstrukce stávajícího venkovního vedení. Mezi tyto výhody patří rychlejší řešení a méně časově náročné postupy. Zvyšování napětí však požaduje určité striktní podmínky. Mezi podmínky patří bezpečná vzdálenost k zemi a k překážkám, vzdálenost mezi fázemi a k uzemnění, šířka bezpečnostního pásu země, izolační požadavky, elektrická intenzita pole vodiče, dopady na transformátory se zvyšováním napětí. [1]

2.3 Rozsáhlá řešení

2.3.1 HSIL vedení

HSIL (High Surge Impedance Loading) je nový pojem přenosových linek, který je založen na zvýšení zátěžné vlnové impedance přirozeného výkonu

$$P_{prir} = \frac{U^2}{Z_{vln}} \quad (2.1)$$

$$Z_{vln} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.2)$$

Vzorec zobrazuje, že vyššího přirozeného výkonu může být dosaženo zvýšením kapacity C a snížením indukčnosti L . HSIL používá kombinace vlastností, jako jsou

přidání dílčích vodičů na fázi, zvýšení velikosti svazku pro každou fázi, použití asymetrických svazků, snížení vzdáleností mezi fázemi.[1]

Pokud se jedná o výpočet provozní indukčnosti pro jednoduché vedení s různými druhy svazkových vodičů je definována následující rovnice:

$$L_p = 0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r_e} \quad (2.3)$$

kde d_s je vzdálenost mezi vodiči, která je popsána v rovnici (2.4) a r_e popisuje ekvivalentní poloměr, který zahrnuje vnitřní indukčnost závislou na permeabilitě materiálu vodiče. [6]

$$d_s = \sqrt[3]{d_{ab}d_{ac}d_{bc}} \quad (2.4)$$

kde d_{ab}, d_{ac}, d_{bc} jsou vzdálenosti mezi fázemi a, b, c

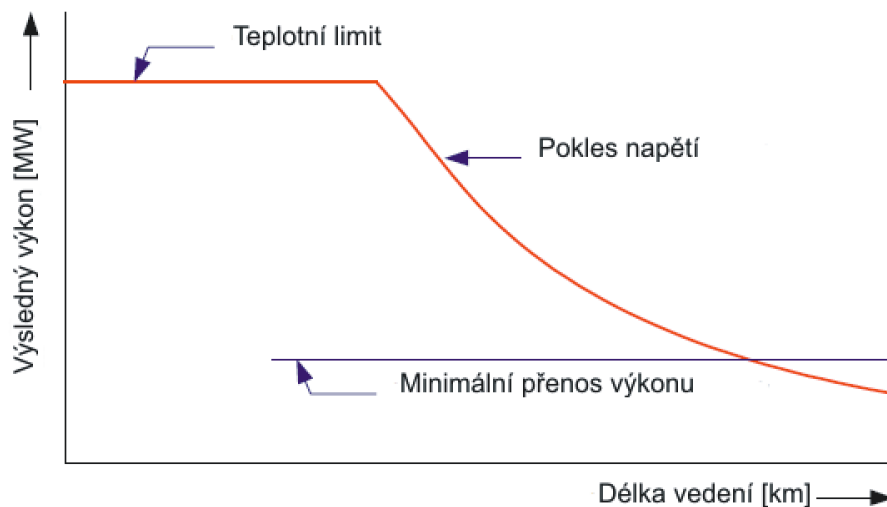
Podle typu svazku dosadíme za r_e :

$$\text{pro dvojsvazek: } r_e = \sqrt{r \cdot a}$$

$$\text{pro trojsvazek: } r_e = \sqrt[3]{r \cdot a^2}$$

kde r představuje skutečný poloměr a a je vzdálenost vodičů ve svazku.

Přenosová schopnost vedení je limitována z několika důvodů. K omezení z důvodu poklesu napětí dochází u delších linek z důvodu zvyšující se reaktance X_L . Pokud k omezení dojde, HSIL napomůže k omezení poklesu napětí a zvýší se tedy schopnost přenášet větší výkon. [1]



Obr. 2.3: Maximální zatížení oproti délce vedení [1]

HSIL linky jsou neúčinnější v případě vysoké elektrické energie a přenosu energie na dlouhé vzdálenosti (více než 250 km), proto se používají hlavně v Rusku, Brazílii a Číně. Pro krátká a silně namáhaná vedení jsou HSIL linky zbytečně moc drahé. HSIL vedení mohou zvýšit účinnost v koridorech, které jsou vybaveny paralelními vedeními různých elektrických charakteristik, dle vyvažování energie toku podle způsobu změny vnitřní impedance jedné nebo všech paralelních větví.[1]

2.3.2 Konverze AC – DC

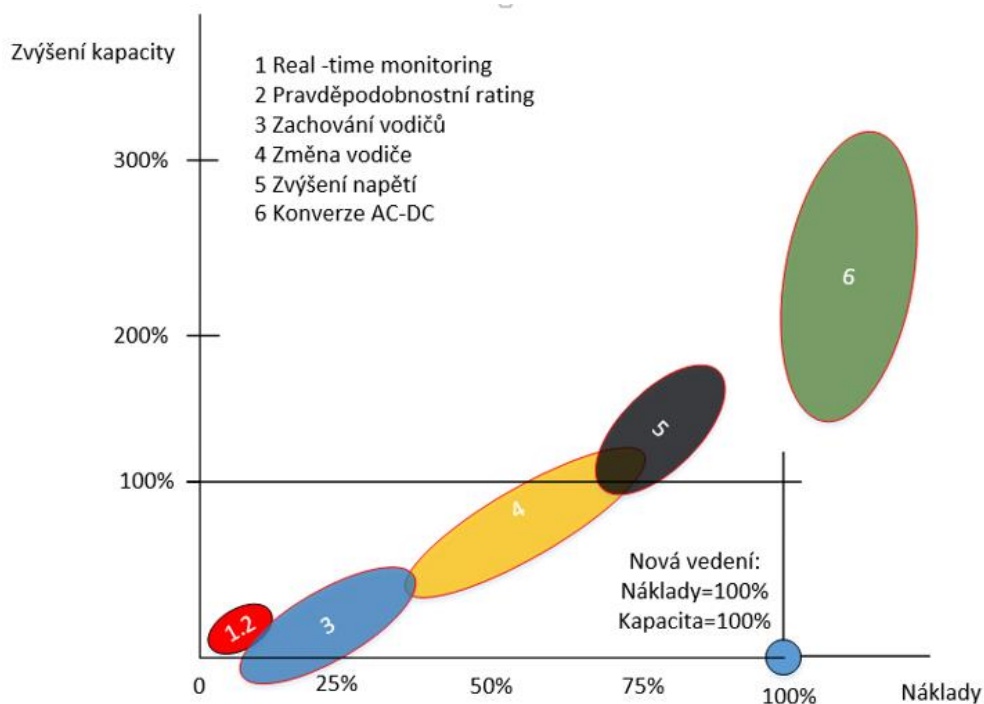
Třífázové systémy AC jsou normou pro celosvětový přenosový systém, zatímco DC systémy se používají většinou pouze pro přenosy na velkou vzdálenost a propojení rozdílných rozvodných systémů. Na první pohled není zásadní fyzický rozdíl mezi AC a DC vedeními. Kromě počtu vodičů, provoz střídavého a stejnosměrného venkovního vedení je podobný. Oba systémy používají vzduch jako izolaci, dále je potřeba, aby mezi jednotlivými vodiči a mezi vodičem a zemí byla dostatečná vzdálenost. V obou systémech samozřejmě nesmí chybět ochrana proti blesku. Detailnější jsou rozdíly v druhu a délce izolátoru, v úrovni koróny a magnetického pole. Tyto rozdíly ovlivňují zvyšování kapacity linek AC na DC. Výhoda stejnosměrného přenosu je absence jalového výkonu (cca 15%) a také nedochází ke ztrátám skinefektem (přibližně 10%). Naopak výhodou AC je přenos energie na větší vzdálenosti.[1]

$$P_{DC} = \frac{\sqrt{2} P_{AC}}{0,85} = 1,8 P_{AC} \quad (2.5)$$

V některých případech a za určitých podmínek mohou být stávající AC linky převedeny na DC linky přidáním AC-DC měniče ve prospěch systému. Pokud se použije měnič na obou koncích, může se jednat o velice drahou záležitost. Za účelem snížení nákladů, by mohl být výhodný unipolární systém, kdy se proud vrací přes zem. Tento systém se bohužel nepoužívá, protože by mohlo dojít k možnosti poškození podzemních systému, jako jsou potrubí a telekomunikační kabely. Využívá se tedy systému dvojpólového a trojpólového. [1]

2.4 Zhodnocení

Na obrázku 2.4 je zobrazeno porovnání řešení zvýšení kapacity vedení. Je zde zobrazena závislost poměrných nákladů za určitou metodu na zvýšení přenosové kapacity. Největší navýšení přenosové kapacity je u metody konverze AC-DC, bohužel za cenu vysokých nákladů. Nejmenší náklady vychází u real-time monitoring systému, zde ale musí být počítáno s malým navýšením kapacity.[1]



Obr. 2.4: Porovnání jednotlivých metod pro zvýšení ampacity [1]

3 Teoretické vztahy pro výpočet zatížitelnosti vodičů

Výpočet proudové zatížitelnosti vodičů vyžaduje řešení rovnice přenosu tepla, které definuje funkční vztah mezi protékajícím proudem vodiče, jeho teplotou a okolím. Mezi dvě nejdůležitější úlohy pro výpočet ampacity patří určení teploty vodiče při daném proudovém zatížení a stanovení zatěžovacího proudu pro daný materiál vodiče vzhledem k teplotě jádra vodiče. Za účelem splnění těchto podmínek se musí vypočítat teplo generované uvnitř vodiče a míra jeho rozptylu od vodiče pro daný materiál vodiče. Schopnost okolního prostředí pro rozptýlení tepla hraje velmi důležitou roli v určování zatížitelnosti a značně se liší několika faktory, jako je teplota okolí a povětrnostní podmínky. Teplo přenášené prostřednictvím vodiče se přenáší několika způsoby. Způsoby přenosu teplot tedy jsou vedení, proudění a sálání. [3][10]

3.1 Tepelná bilance vodiče

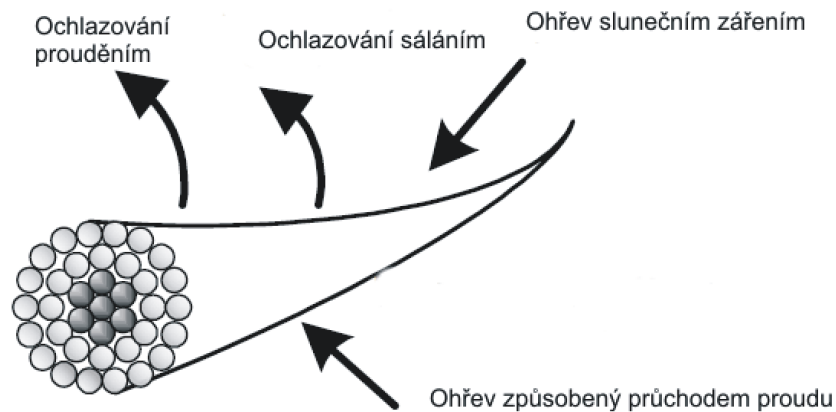
Vedení je hlavním přenosovým mechanismem uvnitř vodičů. Předpokládá se, že teplo nahromaděné uvnitř vodiče je označeno P_J . Další zdroje tepla mohou být získávány ze slunce, je-li vodič vystaven slunečnímu záření. Proudící energie je způsobena vedením, sáláním a radiací z povrchu vodiče. Tepelná bilanční rovnice je pak definována následovně:

$$P_J + P_M + P_S + P_I = m_c c_c \cdot \frac{dT}{dt} + P_C + P_R + P_W \quad (3.1)$$

P_M [W/m] – magnetické zahřívání od změny magnetického pole střídavého proudu, P_S [W/m] – tepelný zisk na jednotku délky způsobený solárním zářením, P_I [W/m] – zahřívání od koróny, P_C [W/m] – tepelné ztráty způsobené prouděním, P_R [W/m] – tepelné ztráty způsobené sáláním, P_W [W/m] – ochlazování odpařováním vody, c_c – tepelná kapacita, m_c [kg/km] – hmotnost vodiče na kilometr

Při hodnocení ampacity je zanedbán vliv magnetického ohřevu, ohřevu korunou a ochlazování odpařováním vody z důvodu jejich velmi malého vlivu.[8]

$$P_J + P_S = P_C + P_R \quad (3.2)$$



Obr. 3.1: Zobrazení přívodu a odvodu tepla vodiče [7]

3.1.1 Ohřev vodiče způsobený průchodem proudu

$$P_J = R_{DC} k_{AC} I^2 [1 + \alpha(T_{av} - 20)] \quad (3.3)$$

R_{DC} [Ω] – stejnosměrný odpor lana při 20 °C na jednotku délky, α [K^{-1}] – teplotní součinitel rezistivity, T_{av} [$^{\circ}C$] – teplota vodiče, I [A] – efektivní proud, k_{AC} – činitel povrchového jevu (doporučuje se $k_{AC}=1,0123$)

Ohřev vodiče je způsoben průchodem elektrického proudu vodičem a zahrnuje Joulovy ztráty, elektromagnetické ztráty a skinefekt. Elektromagnetické ztráty jsou způsobeny ohřátím vodiče opakovaným přemagnetováním, které způsobuje ohřev vířivými proudy. U střídavého proudu se odpor zvýší vlivem skinefektu. Skinefekt se projeví vytlačení proudu k povrchu vlivem magnetického pole uvnitř daného vodiče. Odpor vodiče u střídavého proudu je k_{AC} -krát větší než u stejnosměrného. [5]

Výpočet střídavého odporu je poté vyjádřen následovně:

$$R_{AC} = k_{AC} R_{DC} \quad (3.4)$$

3.1.2 Ohřev slunečním zářením

Teplota vodiče získaná slunečním zářením závisí na absorpci povrchu, průměru vodiče, úhlu dopadu a odrazivosti povrchu pod vodičem a jeho intenzitě. Zohledňují se také elementy jako solární deklinace, hodinový úhel od slunce a zeměpisná šířka. Celkové záření je složené z přímého, rozptýleného a odraženého záření. Při jasné obloze dopadá

na zemský povrch největší část slunečního záření bez změny směru dopadu, jedná se tedy o záření přímé. Pokud se přímé záření rozptýlí v mracích, jedná se o rozptýlené záření. Odražené záření pak vzniká odražením od okolních předmětů. Měřit jednotlivé složky slunečního záření je velice náročné z finančního i technického hlediska, proto se měří pouze celkové sluneční záření dle rovnice (3.5). Celkový výkon dodaný se slunce lze řídit koeficientem, který nabývá hodnot od nuly (noc) do jedné (jasno) dle pokrytí oblohy mraky, které snižují celkový výkon dodaný ze slunečního záření. Pokud by vodičem neprocházel proud, teplota vodiče by se rovnala součtu teplot získaných ze slunečního záření a z okolí. Intenzita slunečního záření dosahuje během dne hodnot od 0 až do 1200 W/m². [5] [8] [11] [15]

$$P_S = \varepsilon_s I_s D \quad (3.5)$$

$\varepsilon_s [-]$ – koeficient absorpce záření, $I_s [W/m^2]$ – intenzita slunečního záření, $D [m]$ – vnější průměr vodiče

3.1.3 Ochlazení vodiče prouděním

S tepelnou výměnou prouděním je možné se setkat pouze u plynných nebo kapalných látek. Pohybem látek dochází k vzájemnému pohybu jednotlivých částí s odlišnou teplotou a hustotou vnitřní energie, tím dochází k přenosu tepla prouděním. Tento způsob přenosu tepla je rychlejší, než šíření tepla vedením. Proudění tekutin se dělí na laminární a turbulentní. Laminární proudění je jev, kdy nedochází k promíchání jednotlivých částic látky. Při turbulentním proudění se naopak částice látek pohybují neuspořádaně a dochází k jejich promíchávání. Tento typ proudění vznikne, pokud je překročen kritický poměr mezi setrvačnými a třecími silami. [16]

Přenos tepla prouděním je také určen dle vlastností toku. Mluví se tedy o nucené konvekci, pokud je tok způsoben vnějšími vlivy jako ventilátorem, větrem a čerpadlem. Naopak při přirozené konvekci je tok vyvolán vztlakem sil, které vznikají z rozdílů hustoty způsobené změnami teploty ve vzduchu. Předpokládáme, že přirozená konvekce probíhá na vnějším povrchu vodiče. [10]

Proudění je z matematického hlediska komplikovaný proces. Pro teoretické výpočty tedy slouží podobnostní čísla neboli kritéria podobnosti. Podobnostní čísla jsou bezrozměrná čísla, která se používají tam, kde jsou si nezávislé veličiny v souvislosti

s některými jevy podobné. Kritéria podobnosti se používají většinou v mechanice tekutin. Příkladem může být Reynoldsovo číslo dle rovnice (3.6), které dává do souvislosti setrvačné síly a viskozitu (tzn. odpor prostředí v důsledku vnitřního tření). Poté se pomocí Reynoldsova čísla může určit, zda se jedná o turbulentní nebo laminární proudění.

Podobnostní čísla:

- Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{\rho_r \cdot V \cdot D}{\nu_f} \quad (3.6)$$

$V[m/s]$ – rychlost větru, ρ_r - relativní hustota vzduchu - ($\rho_r = \frac{\rho}{\rho_0}$, kde ρ je hustota vzduchu v nadmořské výšce, ρ_0 - hustota vzduchu a úrovni moře, ν_f – kinematická viskozita vzduchu

- Grashofovo číslo

$$Gr = \frac{D^3(T_{av} - T_a)g}{(T_f + 273)\nu_f^2} \quad (3.7)$$

$g = 9,81 m/s^2$ – normální tíhové zrychlení, T_a – teplota okolí, T_{av} – teplota vodiče, $D [m]$ – vnější průměr vodiče

- Prandtlovo číslo

$$Pr = \frac{c\mu}{\lambda_f} \quad (3.8)$$

$c [J/kgK]$ – měrné teplo vzduchu při konstantním tlaku, $\mu [kg/ms]$ – dynamická viskozita vzduchu, $\lambda_f [W/mK]$ – teplotní vodivost vzduchu

Empirické rovnice pro výpočet výše uvedených proměnných:

$$\nu_f = 1,32 \cdot 10^{-5} + 9,5 \cdot 10^{-8}T_f \quad (3.9)$$

$$\lambda_f = 2,42 \cdot 10^{-2} + 7,2 \cdot 10^{-5} T_f \quad (3.10)$$

$$P_r = 0,715 - 2,5 \cdot 10^{-4} T_f \quad (3.11)$$

$$T_f = 0,5(T_{av} + T_a) \quad (3.12)$$

Ztráty ve vodiči způsobené prouděním se vypočítají následovně:

$$P_c = \pi \lambda_f (T_{av} - T_a) Nu \quad (3.13)$$

Nusselotovo číslo je podobnostní číslo, které se určí z předpokladu nucené nebo přirozené konvekce.[5]

Nucená konvekce

V běžném provozním rozsahu teplot T_f může být Nusselotovo číslo vyjádřeno následovně:

$$Nu_N = B_1 (Re)^n \quad (3.14)$$

kde B_1 a n jsou konstanty závislé na Reynoldsově čísle a hrubosti povrchu vodiče R_f (3.15), dle tabulky 3. 1.[5]

$$R_f = \frac{d}{[2(D - d)]} \quad (3.15)$$

Tabulka 3.1 – Konstanty pro výpočet nuceného chlazení prouděním

povrch	Re		B ₁	n
	od	do		
Všechny povrchy lan	10 ²	2,65 · 10 ³	0,641	0,471
Lana R _f ≤ 0,05	> 2,65 · 10 ³	5 · 10 ⁴	0,178	0,633
Lana R _f > 0,05	> 2,65 · 10 ³	5 · 10 ⁴	0,048	0,800

Jako průměr drátu d je považován průměr vnější vrstvy drátu (obvykle u neželezných lan). Průměr vodiče D by měl být celkový průměr i navzdory tomu, že lankový vodič může mít povrchovou plochu o 40 až 45% větší, než by měl pouze hladký vodič o stejném průměru. To je proto, že mezní vrstva každého drátu se znovu naváže na další a tím se vytvoří mrtvé prostory v mezerách mezi jednotlivými dráty a ke konvekci dochází až v oblasti vnějšího průměru lana.[5]

Přirozená konvekce

Nusseltovo číslo pro přirozenou konvekci závisí na Grashofově a Prandtlově čísle.

$$Nu_v = c_v (Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad (3.16)$$

Hodnoty pro konstanty c_v se pohybují v rozsahu od 0,436 až 0,54. Většinou se uvažuje $c_v = 0,5$.

Pro spojitý přechod volné konvekce na nucenou se užije tato rovnice:

$$Nu = \sqrt[4]{Nu_v^4 + Nu_N^4} \quad (3.17)$$

Pro přechod při volné konvekci na $Nu = Nu_v$ platí $Nu_v \gg Nu_N$ a pro přechod při nucené konvekci na $Nu = Nu_N$ platí $Nu_v \ll Nu_N$. [4]

Pokud by byl brán v úvahu i směr větru, bude Nusseltovo číslo řízené ještě řídicím faktorem K_{angle} . [4]

$$K_{angle} = 1,194 - \cos\phi + 0,194\cos 2\phi + 0,368\sin 2\phi \quad (3.18)$$

Faktor udávající směr větru je založen na úhlu Φ mezi směrem větru a jeho kolmostí na osu vodiče.

Součinitel přestupu tepla je vyjádřen:

$$\alpha_k = K_{angle} \cdot \frac{Nu \cdot \lambda f}{D} \quad (3.19)$$

Proporcionální konstanta α_k ($W/m^2 \cdot K$) vyjadřuje koeficient přestupu tepla. Stanovení součinitele přestupu tepla je nejdůležitějším úkolem při výpočtu hodnocení vodičů ve vzduchu. Hodnota koeficientu se pohybuje mezi 2 a 25 $W/m^2 \cdot K$ pro volnou konvekci a mezi 25 a 250 $W/m^2 \cdot K$ pro nucenou konvekci v plynech. [4]

Výsledný vztah tepelného výkonu, který je odveden z lana tepelným prouděním, je vyjádřen:

$$P_c = \alpha_K \cdot D \cdot \pi \cdot (T_{av} - T_a) \quad (3.20)$$

3.1.4 Ochlazení vodiče sáláním

Při přestupu tepla z povrchu vodiče do okolního prostředí dochází k sálání. Vyzářená energie tělesem se přenáší do okolí elektromagnetickým vlněním. Ztráty způsobené sáláním jsou obvykle malou částí z celkových tepelných ztrát, obzvláště v porovnání se ztrátami vzniklými nucenou konvekci. V případě, že těleso s větší teplotou vyzařuje energii do svého okolí o nižší teplotě, což je v případě vodičů holých i izolovaných, rovnice je poté vyjádřena následovně.[8]

$$P_r = \pi \varepsilon \sigma_B S [T_{av}^4 - T_a^4] \quad (3.21)$$

σ_B - Stefan – Boltzmannova konstanta $\sigma_B = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$, T_a [°C] - venkovní teplota, T_{av} [°C] – teplota vodiče, ε [-] - radiační vlastnost povrchu zvaná emisivita, S [m²] - velikost plochy

Hodnota ε se pohybuje v rozsahu $0 \leq \varepsilon \leq 1$ (hodnota 1 odpovídá černému tělesu) a závisí na teplotě, vlnové délce a materiálu povrchu vodiče. V závislosti na povrchu ε se mění od 0,27 odpovídající světlemu zapletenému vodiči hliníku do 0,95, která je platná pro zvětralé vodiče v průmyslových oblastech. Ve většině případů se používá hodnota 0,5.[5]

3.1.5 Chlazení odpařováním vody

Chlazení vypařováním vody není vždy zaznamenáno. Pokud dojde k jeho detekování, jedná se o vodní páru, kdy je proces vidět ve vzduchu. Další možností odpaření vody je vodními kapkami, ty jsou unášeny tokem kolem vodiče. Chlazení odpařováním vody je zaznamenáno hned, jak je vodič namočen. Ve většině případů se odpařování vody zanedbává.[8]

3.1.6 Měrná tepelná kapacita vodiče

Tepelná kapacita vyjadřuje schopnost vodiče akumulovat teplo. Tato vlastnost je závislá na hmotnosti a materiálu daného vodiče. Měrná tepelná kapacita je definována pro každý materiál. Pokud by byl vodič složen ze dvou materiálů, např. AlFe lana, celková kapacita by pak byla součtem tepelné kapacity jádra a tepelné kapacity pláště dle vztahu (3.22). [5]

$$c_c = \frac{c_{Al} \rho_{Al} S_{Al} + c_{Fe} \rho_{Fe} S_{Fe}}{\rho_{Al} S_{Al} + \rho_{Fe} S_{Fe}} \quad (3.22)$$

$$m_c = \rho_{Al} S_{Al} + \rho_{Fe} S_{Fe} \quad (3.23)$$

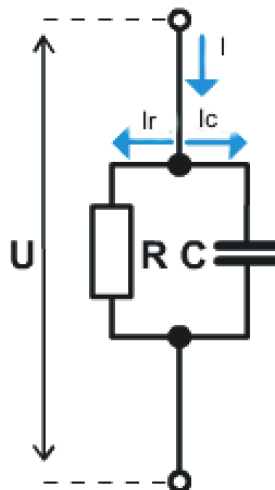
c_c [J/kg.K] – měrná tepelná kapacita vodiče, ρ_{Al} [kg/m³] – hustota hliníku, ρ_{Fe} [kg/m³] – hustota oceli, S_{Al} [m²] – průřez pláště vodiče, S_{Fe} [m²] – průřez jádra, m_c [kg] – hmotnost vodiče

3.2 Tepelná bilance izolovaného vodiče

Izolované vodiče jsou na rozdíl od holých vodičů pokryty ochrannou vrstvou plastické nebo kovové izolace a tím zachovávají teplo lépe než holé vodiče. Tepelná bilance na povrchu vodiče je stejná jako u holého vodiče. Vznikají ve vodiči stejné tepelné zisky a ztráty, ale rozdíl je dán izolací, kde jsou odlišnosti od holého vodiče. V izolovaném vodiči vznikají navíc ztráty v izolaci, tedy ztráty dielektrické. [10]

Dielektrické ztráty

Izolované vodiče jsou v principu jako kondenzátory. V ideálním případě představuje vodič izolační odpor a kapacitu viz obr. 3.2. Čím je delší vodič, tím je větší kapacita. [18]



Obr. 3.2: Náhradní schéma izolovaného vodiče[18]

Pokud je tedy dielektrická izolace vodiče vystavena střídavému napětí, vznikají velké kapacity a nabíjecí proudy I_c (proudy naprázdno). Při každé změně směru napětí (50 nebo 60 krát za sekundu) dochází k přeskupení elektronů, tím vzniká teplo a snižuje se činný výkon, to je nazýváno ztrátami dielektrickými. Velikost nabíjecího proudu je funkcí dielektrické konstanty izolace, rozměrů kabelu a provozního napětí. U některých kabelových konstrukcí, zejména u kabelů vysokého napětí, mohou mít tyto ztráty velký vliv při hodnocení kabelů.[17]

Dielektrické ztráty se vypočítají dle vzorce:

$$P_d = UI_c \operatorname{tg} \delta = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta \quad (3.24)$$

kde δ je ztrátový úhel a $\operatorname{tg} \delta$ ztrátový činitel izolace kabelu. Ztrátový činitel je důležitý ukazatel kvality dielektrika a závisí na teplotě, kmitočtu, na intenzitě elektrického pole a také na tom, zda vznikají částečné výboje.

4 Návrh způsobů simulace

Cílem mé diplomové práce bylo porovnání zatížitelnosti holého a izolovaného vodiče. Pro ověření teoretických předpokladů jsou provedeny simulace ve dvou různých simulačních prostředích, jednalo se o Comsol Multiphysics a Matlab/Simulink Simscape. Simulace jsou ukázány pro 2 různé stavy. V první části jsou zobrazeny výsledky simulace v ustáleném a stavu pro oba typy vodičů. Pro simulace jsou použity parametry dané normou ČSN EN 50341-3-19, efektivní hodnoty proudů jsou určeny dle parametrů udávaných výrobcem vodičů. Výsledky ze simulací z obou simulačních prostředí jsou dále porovnány. V druhé části jsou vykresleny výsledky simulací opět pro oba typy vodiče v tomto případě ve stavu přechodovém. V poslední části práce jsou porovnány výsledky ze simulací s hodnotami reálného holého vodiče. V tomto případě se jedná o dynamický ohřev. Pro simulace v druhé části jsou tedy použity hodnoty odpovídající měřeným datům. K porovnání jsou použity celohliníkový vodič o průměru 16 mm a izolovaný vodič o stejném průměru doplněný o izolaci z polyethylenu.

4.1 Použité vodiče

4.1.1 Holé vodiče

Lana mohou být buď jednoduchá (Al, Cu, Fe) nebo kombinovaná, která mají nosnou část (jádro) a elektrovodnou část (plášť). Nejčastěji se používají kombinovaná lana AlFe, z nichž tvoří nosnou část železo a proudovodnou část tvoří hliník. AlFe je sláněný vodič s ocelovým jádrem a hliníkovým obalem. Velký průměr lan AlFe pro vvn zabraňuje koróně. Vodič je mezinárodně označován jako ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced). Předností tohoto typu vodiče je, že změnou poměru průřezu hliníku a oceli dosahuje vyšší pevnosti na úkor vodivosti, což je velká výhoda pro oblasti s vysokou námrazou. Podle normy se vyrábějí se stejným průřezem jako izolované vodiče s nejmenším průřezem 16 mm². Nejrozšířenějším lanem při výstavbě vedení vn je AlFe 6, kde číslo 6 značí poměr průřezu hliníku a ocelové duše lana. Tento způsob značení je zastaralý, byl nahrazen novým značením vodiče. Např. AlFe 42/7, kde čísla označují průřez hliníku / průřezem oceli ve vodiči v mm².

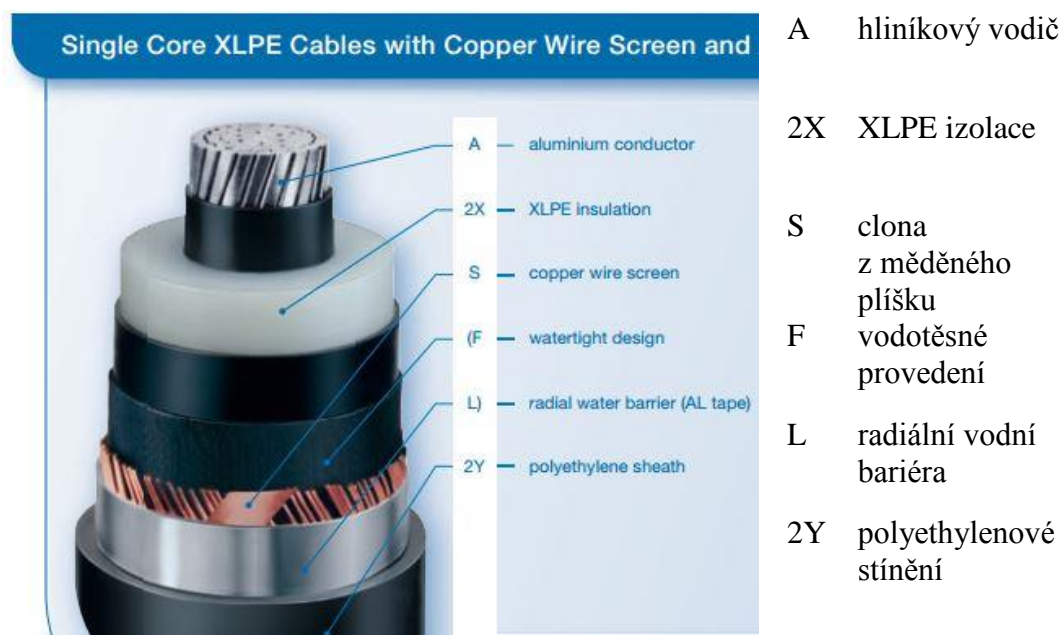
V simulacích jsem použila jako holý vodič celohliníkový vodič. Celohliníková lana mohou být nastavena oproti AlFe lanům na vyšší teplotu než je 80°C. Celohliníkové

vodiče mají dobrou antikorozi ochranu, nepřítomnost ocelového jádra odstraňuje galvanickou korozi, která vzniká u lan AlFe.

4.1.2 Izolované vodiče

Izolované vodiče mohou být buď s jednoduchou, nebo vícevrstvou izolací. U jednoduché izolace jde o holý slaněný vodič ze slitiny hliníku potažený izolační vrstvou. Izolační vrstva je složena z PE (polyethylenu) nebo PVC (polyvinylchloridu). Tloušťka izolace je volena dle provozního napětí. Nejvyšší dovolená provozní teplota u vodičů s PE a PVC izolací je 70°C. Pokud by byla potřeba použít vyšší dovolenou provozní teplotu, používá se vodič ze zesíťovaného polyetylenu XLPE. Tento vodič je odolnější proti klimatickým vlivům a UV záření.

U vícevrstvého, tedy u vodiče s třívrstvou izolací, se bere v úvahu opět holý vodič, který je potažen třemi vrstvami izolace. Tato třívrstvá izolace je složena ze stínění z polovodivé pásky, z hlavní izolace tvořené z voděodolné XLPE sloučeniny a z pláště, který tvoří XLPE izolace. Příklad vodiče s XLPE izolací je na obr. 4.1 Tato izolace na rozdíl od PE a PVC odolává teplotě až 90°C.



Obr. 4.1: Jednožilový vodič s XLPE izolací

4.2 Simulace holého vodiče v ustáleném stavu

V této části jsou zobrazeny výsledky simulací z programu Comsol a z programu Simulink pro holý vodič. Nejprve jsem vytvářela 2D model holého vodiče v programu Comsol Multiphysics. Program je určen pro řadu fyzikálních oborů, jako jsou dynamika tekutin, přestup tepla, pružnost a pevnost, akustika, elektromagnetické jevy a chemické procesy. Comsol řeší výpočet fyzikálních polí metodou (FEM – Finite Elements Methods) konečných prvků. Tato metoda rozdělí geometricky simulovaný model na konečný počet jednotlivých elementů (částí), které jsou spolu vzájemně propojeny v uzlech. Každý element je popsán matematicky pomocí jednoduchých funkcí nebo diferenciálními rovnicemi. Řešení diferenciálních rovnic je převedeno na řešení soustavy algebraických rovnic

Hlavní předností Comsolu je možnost řešení multifyzikální úlohy. Tento program se skládá z preprocesoru, solveru a postprocesoru. Preprocesor definuje problém, konkrétně geometrii modelu, vlastnosti materiálů, okrajové podmínky daného modelu. Solver slouží k výpočtu řešeného problému. Postprocesor slouží k zobrazení výsledků (grafů).

Jako první jsem řešila simulaci oteplení holého vodiče v ustáleném stavu. V tepelné bilanční rovnici (3.1) platí $m_c c_c \cdot \frac{dT_c}{dt} = 0$, během ustáleného stavu se tedy neakumuluje teplo ve vodiči. Všechny vlivy, které působí na vodič - teplota okolí, elektrický proud, sluneční záření, rychlost a směr větru jsou uvažovány konstantní.

Pro simulace byly vybrány hodnoty, které jsou určeny normou ČSN EN 50341-3-19. Tato norma udává hodnoty:

- teplota okolí 35 °C
- rychlost větru 0,5 m/s pod úhlem náběhu 45° na vodič
- globální intenzita slunečního záření 1000 W/m²
- součinitel emisivity 0,5

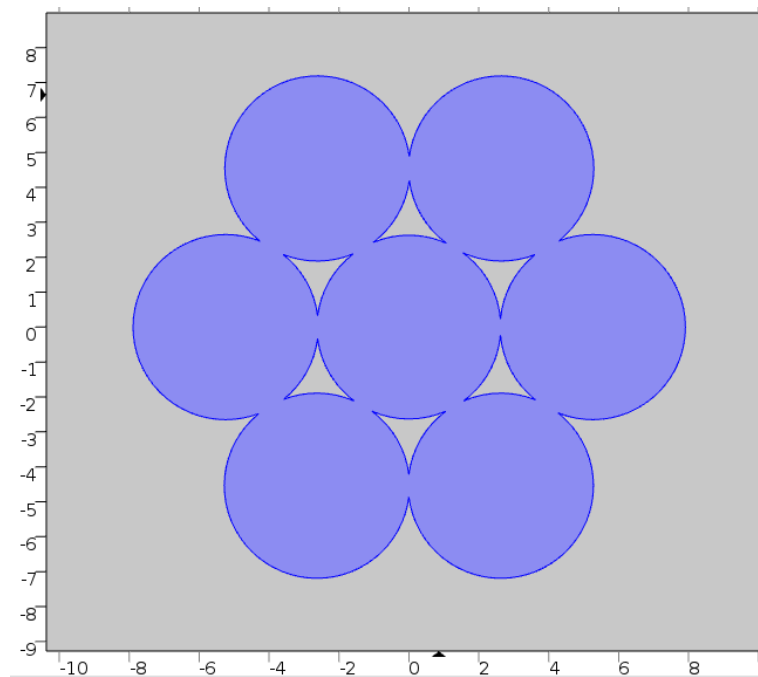
Tyto hodnoty slouží ke stanovení nejvyšší návrhové teploty. Jedná se tedy o nejhorší možný případ oteplení vodiče (nejvyšší intenzita slunečního záření, nejvyšší průměrná teplota okolí, nejnižší rychlost větru).

Pro simulaci v Comsolu jsem si nejprve zvolila řešení modelu ve 2D, který jsem vybrala v „Model Wizard“. Poté jsem při výběru fyziky řešení v „Select Physics“ zvolila sdružení dvou fyzik příkazem „Induction Heating“. V tomto případě Comsol řeší fyziku magnetického pole („Magnetic Field“) a tepelného pole („Heat Transfer in Solids“) vodiče.

Při tvorbě modelu jsem nejprve definovala globální parametry, jakými jsou proud 461 A a teplota okolního prostředí 35°C. Poté jsem vytvořila geometrii vodiče, která je vidět na obr. 4.2 pro holý vodič o průměru 16 mm (modrá oblast). Jedná se o celohliníkový vodič složený ze 7 lan. Parametry pro hliník, které jsou zobrazeny v tabulce 4.1, byly vybrány přímo z knihovny materiálů Comsolu. Jako okolní prostředí byl nadefinován vzduch (šedá oblast).

Tabulka 4.1: Parametry hliníkového vodiče

Relativní permeabilita μ_r [-]	1
Tepelná kapacita C_p [J/kg.K]	900
Tepelná vodivost [W/m.K]	238
Elektrická vodivost [S/m]	$3,774 \cdot 10^4$
Relativní permitivita ϵ_r [-]	1
Hustota ρ [kg/m ³]	2700

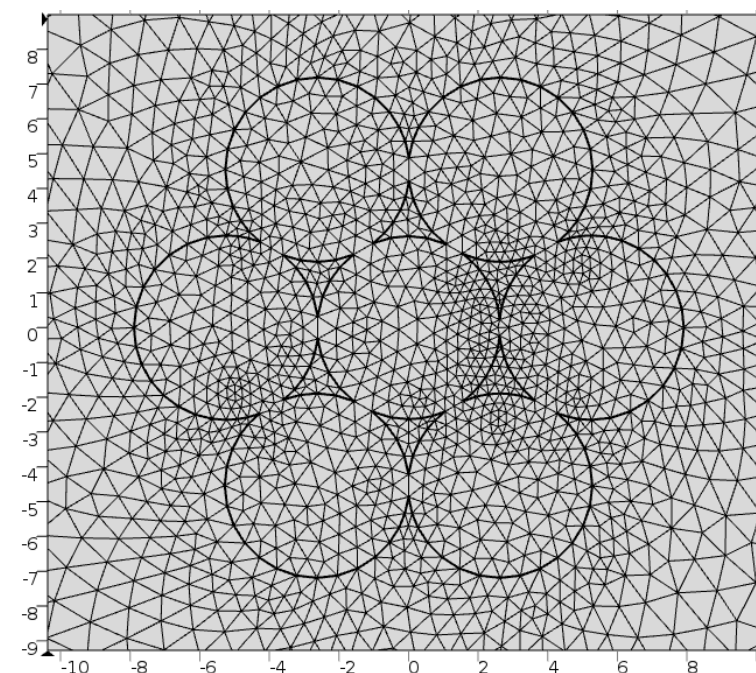


Obr. 4.2 : Geometrie vodiče

Ve fyzice magnetického pole jsem nastavila podmínku „Single-Turn Coil“. V této podmínce je magnetické pole generováno elektrickým proudem, který teče vodivými materiály (zde hliníkový vodič). Funkcí „coil“ lze snadno transformovat proudy (napětí) na formu proudové hustoty. Zde se tedy nastavuje vodivá oblast nebo doména, kde se volí proud 461 A (modrá oblast hliníku viz obr. 4.2).

Ve fyzice tepelného pole jsem zvolila podmínku pro ochlazování vodiče sáláním „Surface-to-Ambient-Radiation“, která vychází z rovnice (3.21), hodnota emisivity zde byla nastavena podle normy na 0,5. V tomto případě je nutné také vymežit oblasti okraje vodiče, protože radiace se šíří do okolí z povrchu vodiče. Další okrajovou podmínkou nastavenou v tepelném poli byla „Convective Heat Flux“, což je podmínka ochlazování vodiče prouděním, která je definována dle rovnice (3.20). Zde se zadává koeficient přestupu tepla α , který jsem určila dle empirických formulí a podobnostních kritérií na hodnotu $\alpha = 12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Vodič je ochlazován z povrchu, proto jsem opět nastavila tuto podmínku na jeho okraj. K doplnění kompletní rovnice tepelné bilance jsem zvolila podmínku pro působení slunečního záření („Heat Flux“) pod úhlem 45° . Intenzita slunečního záření byla zadána $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ opět z normy.

Dalším krokem simulace v Comsolu bylo vytvoření sítě, tzv. „Meshe“. „Mesh“ určuje přesnost celého výpočtu a přímo určuje počet bodů nebo oblastí pro výpočet modelu. Velikost vnitřních oblastí sítě je možné zvolit podle požadované přesnosti výpočtu, zde je zvolen typ „Meshe - extra fine“ viz obr. 4.3.



Obr. 4.3: Síť holého vodiče

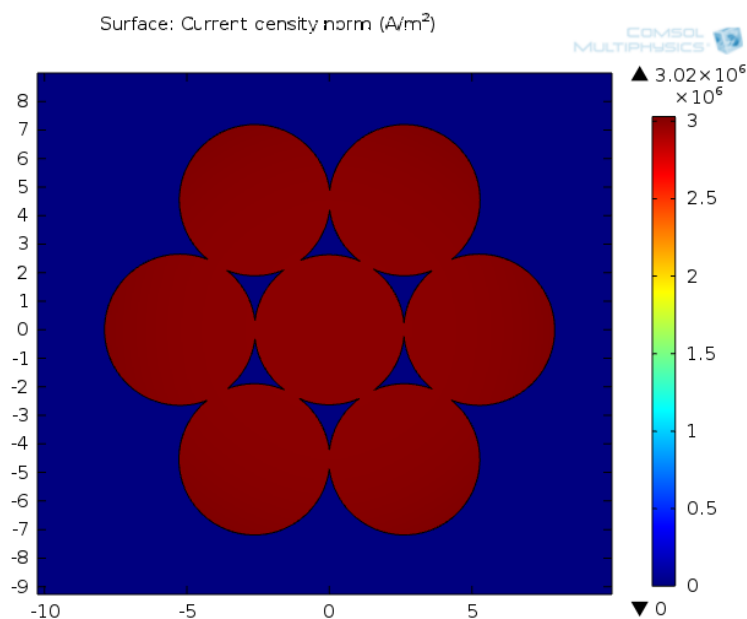
Po vykreslení „Meshe“ jsem zvolila další položku „Study“. Zde se jedná o část Comsolu zvaná Solver a je zde možná volba systému ve statickém („Stationary“), harmonickém („Frequency“) anebo přechodovém stavu („Time dependent“). V tomto případě je zvolen model pro statický a harmonický děj – „Frequency - Stationary“. Po zvolení „Compute“ získám výsledky pro vytvořený model.

4.2.1 Výsledky simulace

V následující kapitole jsou uvedeny výsledky simulace holého vodiče v programu Comsol. Geometrie a „Mesh“ holého vodiče jsou vykresleny na obr. 4.2. a 4.3. Nejprve je zobrazena proudová hustota vodiče, následuje výsledné oteplení vodiče. Výsledek z programu Comsol je ověřen simulací v Matlab/Simulink. Výsledky jsou vykresleny v Excelu, kde je časová konstanta odečtena z výsledků simulace v Matlab/Simulink.

Proudová hustota

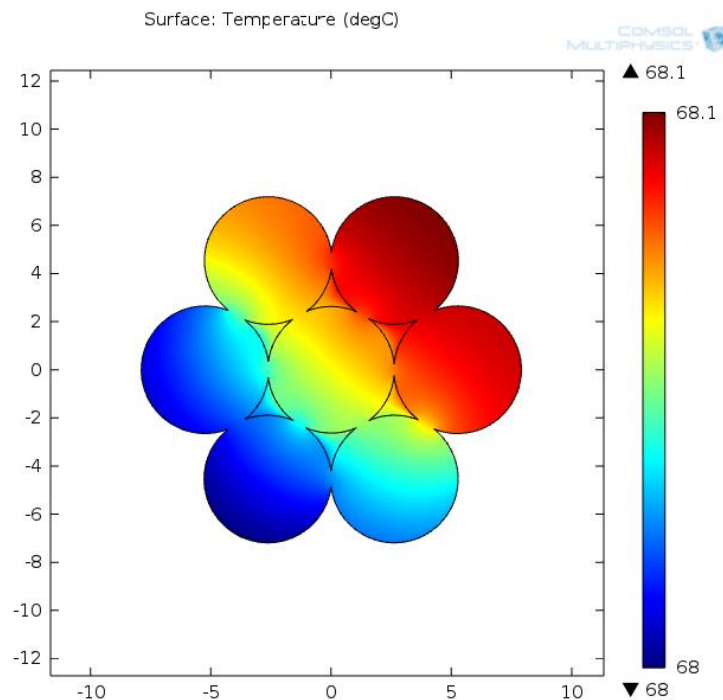
Jak jsem již zmínila v kapitole 4.2, pro holý vodič o průměru 16 mm byl nastaven střídavý proud o frekvenci 50 Hz a o amplitudě 461 A. V tomto případě se skin efekt neprojeví, protože je průměr vodiče menší než hloubka vniku. Rozložení proudové hustoty je vidět na obr. 4.4. Z obrázku je patrné, že největší proudová hustota je v lanech vodiče a nulová hustota se objevuje v okolí vodiče.



Obr. 4.4: Zobrazení proudové hustoty

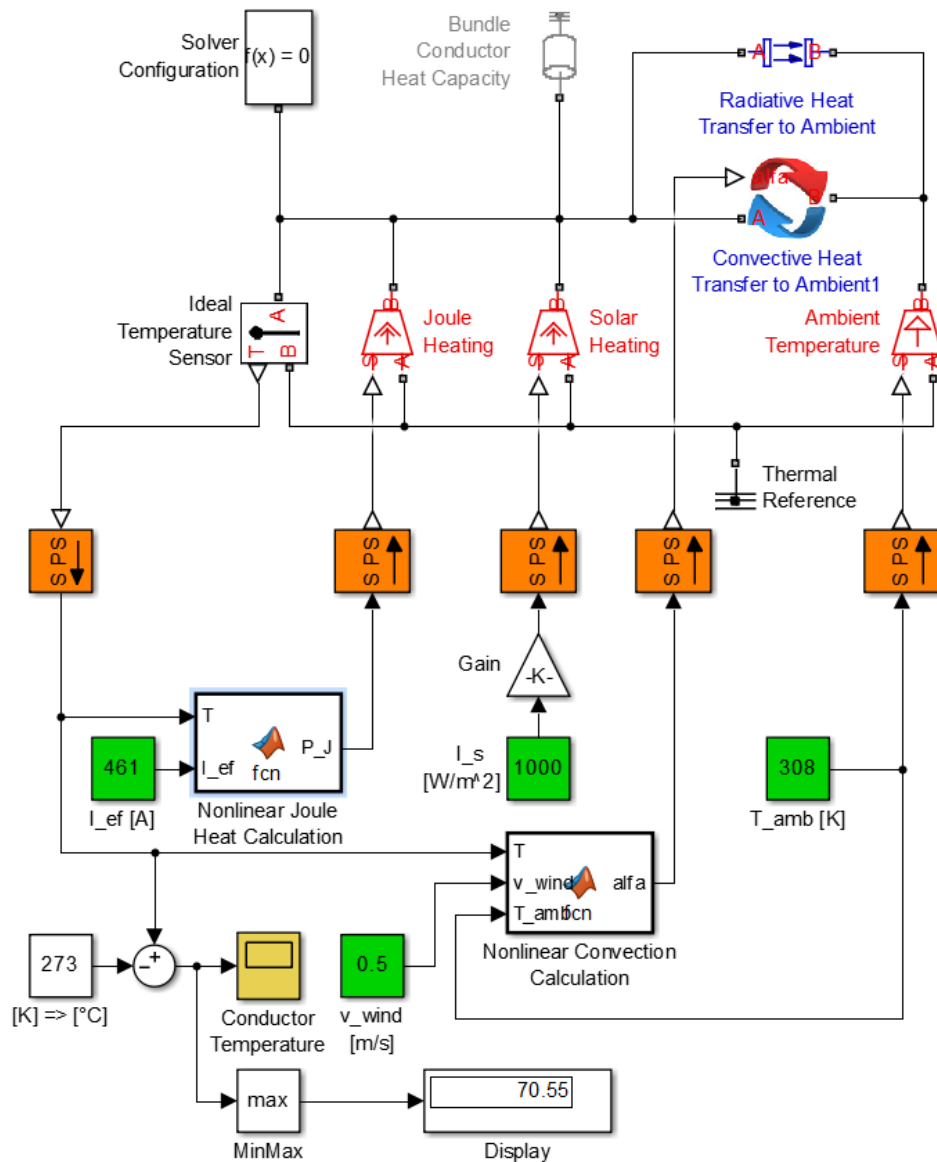
Výsledné oteplení vodiče

Výsledný ohřev vodiče je znázorněn na obr. 4.5, kde jsou vykresleny oblasti největšího a nejmenšího oteplení vodiče. V ustáleném stavu se největší a nejmenší teplota liší pouze o 0,1°C. V grafu je i přesto patrný rozdíl teplot. Nejvyšší oteplení vodiče je způsobeno slunečním zářením, které dopadá pod úhlem 45°. Intenzita slunečního záření je $I_s = 1000 \text{ W/m}^2$. Střídavý proud procházející vodičem má velikost 461 A. Teplota v ustáleném stavu dosahuje hodnoty 68,1 °C.



Obr. 4.5: Zobrazení rozložení teploty vodiče

Pro ověření správnosti výsledku simulace z programu Comsol jsem provedla simulace výsledného oteplení vodiče v ustáleném stavu v programu Simulink. Simulink je součástí Matlabu a vytváří prostředí pro simulaci složené z blokových schémat, modelování, analýzu a implementaci dynamických systémů. Pro simulaci jsem použila již vytvořený model programu Simscape, to je tzv. blockset Simulinku. Simscape slouží pro tvorbu elektrických, magnetických, hydraulických, mechanických a tepelných modelů. Model na obr. 4.6 je určen pro simulaci rovnice tepelné bilance. Vstupními hodnotami simulace byly konstantní hodnoty proudu, intenzity slunečního záření, okolní teploty a rychlosti větru (zeleně označené bloky). Vstupní konstanty jsou dále převedeny do bloků, které jsou napsány v skriptovacím jazyce Matlabu, kde je vypočítán koeficient α a Joulovy ztráty. Bloky SPS (označeny oranžově) poté převádějí signál ze Simulinku na signál Simscapu. V další části modelu je signál zpracováván ideálními zdroji tepelné energie (červené bloky). Je zde zahrnut blok pro simulaci tepla prouděním a také blok pro simulaci tepla sáláním. Model je doplněn o blok pro měrnou tepelnou kapacitu vodiče (Bundle Conductor heat capacity), která byla v ustáleném stavu nulová.



Obr. 4.6: Zapojení modelu

Výsledná teplota v ustáleném stavu v programu Comsol byla stanovena na $68,1^{\circ}\text{C}$, teplota v ustáleném stavu v této simulaci (v programu Simscape) je $70,55^{\circ}\text{C}$. Je tedy patrné, že tyto teploty se liší o $2,45^{\circ}\text{C}$.

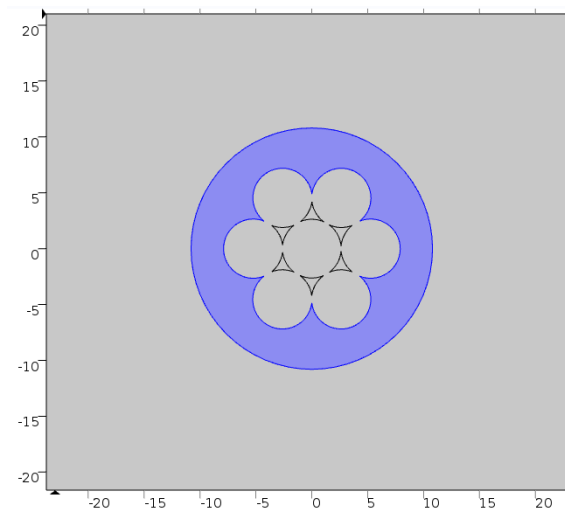
4.3 Simulace izolovaného vodiče v ustáleném stavu

Tato část navazuje na předchozí simulace holého vodiče. Je zde ukázán ustálený stav pro případ izolovaného vodiče. V případě simulace izolovaného vodiče jsem postupovala stejným způsobem jako u holého vodiče. Geometrie a síť vodiče jsou na obr. 4.7 a 4.8, proudová hustota je vykreslena na obr. 4.9. Nejprve jsem prováděla simulaci v Comsolu

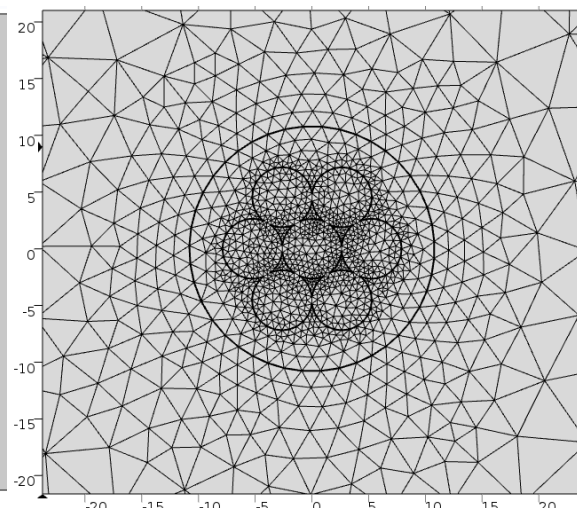
stejným postupem, kde jsem si nadefinovala geometrii vodiče, vykreslila jsem si mesh a dále jsem si nadefinovala okolní teplotu a intenzitu slunečního záření odpovídající normě. U geometrie jsem přidala vrstvu izolace z polyethylenu o tloušťce 2,3 mm. Celkový průměr vodiče je stanoven na 20,6 mm. Hodnoty pro polyethylen jsou zobrazeny v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2 : Parametry polyethylenu

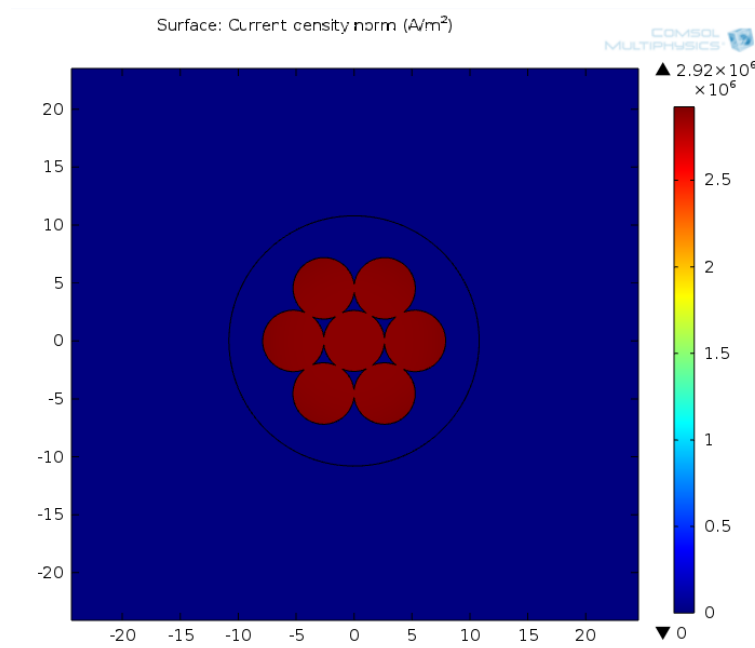
Tepelná kapacita C_p [J/kg.K]	1470
Relativní permitivita ϵ [-]	2.4
Hustota [kg/m^3]	930
Tepelná vodivost [W/m.K]	0.35
Relativní permeabilita μ [-]	1



Obr. 4.7: Geometrie vodiče



Obr. 4.8: Síť vodiče

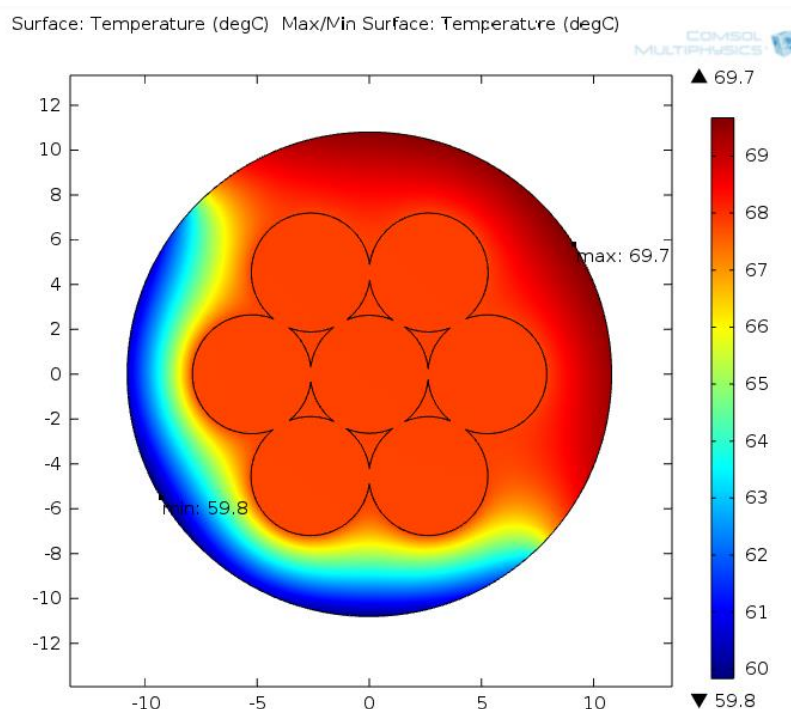


Obr. 4.9: Rozložení proudové hustoty

Okrajové podmínky izolovaného vodiče byly nadefinovány stejně jako v předchozím případě. Proud byl zvolen dle parametrů výrobce 445 A a okolní teplota byla dle normy stanovena na 35°C. U izolovaného vodiče se mění podmínky pro určení hodnoty emisivity. Jedná se o nekovové materiály, v tomto případě o polyethylen, hodnota emisivity nabývá hodnot od 0,8 do 0,95. V této simulaci byla zvolena emisivita s vyšší hodnotou 0,93, neboť se jedná o izolaci matné černé barvy.

Na obrázku 4.10 je vidět, že u izolovaného vodiče jsou velké nesrovnalosti týkající se teploty. Největší teplota je 69,7 °C a tato teplota je opět v místě působení slunečního záření.

Výsledky jsem opět porovnála s výsledky ze Simulinku. Do Simulinku bylo u izolovaného vodiče nutné zahrnout blok simulující izolaci. Výsledná teplota byla stanovena na 74 stupňů. Je zřejmé, že vodič s touto izolací nesplňuje podmínku pro maximální teplotu pro izolaci s polyethylenem o 4 stupně. Podmínky pro výpočet jsou stanoveny normou ČSN EN 50341-3-19, jedná se o nejhorší možný případ. Možným řešením je změna izolace na zesítený polyethylen (XLPE). Tuto izolaci je možné provozovat na 90 stupních (oproti 70 stupňů izolace PE), jak jsem již zmínila v kapitole 4.1.

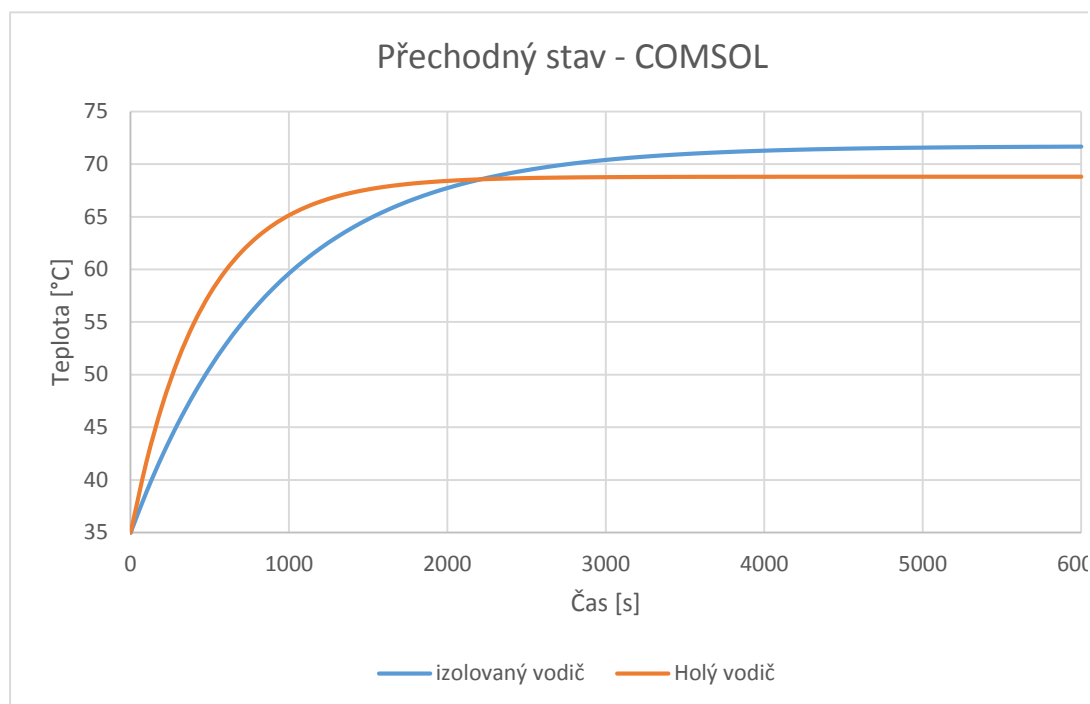


Obr. 4.10: Rozložení teploty izolovaného vodiče

4.4 Simulace holého a izolovaného vodiče v přechodovém stavu

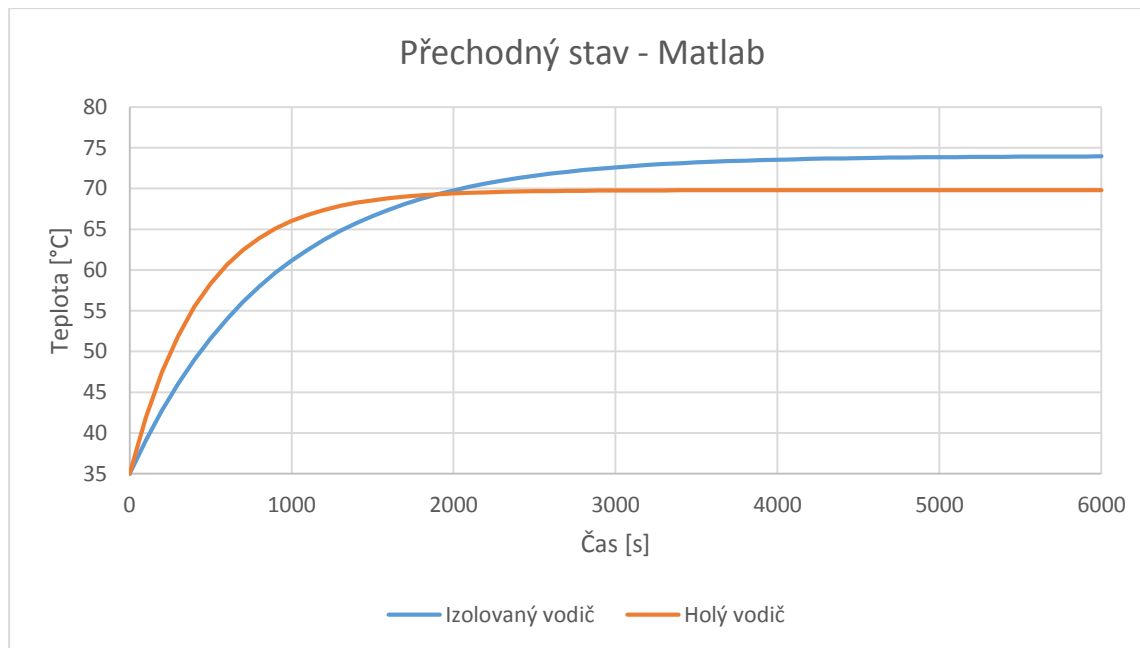
V této části je v simulaci uvažován celý přechodový děj. Postupuji stejně jako v první simulaci. V Comsolu změním podmínku řešení z ustáleného stavu na stav přechodový (Frequency - Transient) a v Simulinku změním hodnotu tepelné kapacity, která je v ustáleném stavu uvažována nulová. Tepelná kapacita nenabývá v přechodovém ději nulových hodnot, musím zadat hodnoty měrné tepelné kapacity materiálu vodiče a také hmotnost. Pro porovnání jsem zvolila stejný proud 480 A pro holý a izolovaný vodič. Odečetla jsem časové konstanty z výsledných grafů. Tyto konstanty jsou pro oba typy vodičů odlišné. V případě holého vodiče je časová konstanta stanovena na 450 s a izolovaného vodiče nabývá hodnoty 900 s. Přechodové charakteristiky průběhu oteplení vodiče při průchodu proudem v závislosti na čase se nazývá oteplovací charakteristika vodiče.

Porovnání holého a izolovaného vodiče v přechodovém ději vypočítaná pomocí programu Comsol je vidět na obrázku 4.11. Z grafu je patrné, že teplota izolovaného vodiče dosahuje vyšších hodnot, po ustálení je 71,7°C a nejvyšší teplota holého vodiče je stanovena na 68,8°C.



Obr. 4.11: Porovnání holého a izolovaného vodiče v Comsolu

Na obr. 4.12 jsou vykresleny výsledky simulace v programu Simulink. V tomto případě dosahuje oteplení vodiče hodnoty $69,8^{\circ}\text{C}$ v případě holého vodiče a u izolovaného vodiče 74°C . Je zřejmé, že vodič s touto izolací nesplňuje podmínku pro maximální teplotu pro izolaci s polyethylenem o 4 stupně. Podmínky pro výpočet jsou stanoveny normou ČSN EN 50341-3-19, jedná se o nejhorší možný případ. Možným řešením je změna izolace na zesílený polyethylen (XLPE). Tuto izolaci je možné provozovat na 90 stupních (oproti 70 stupňů izolace PE).

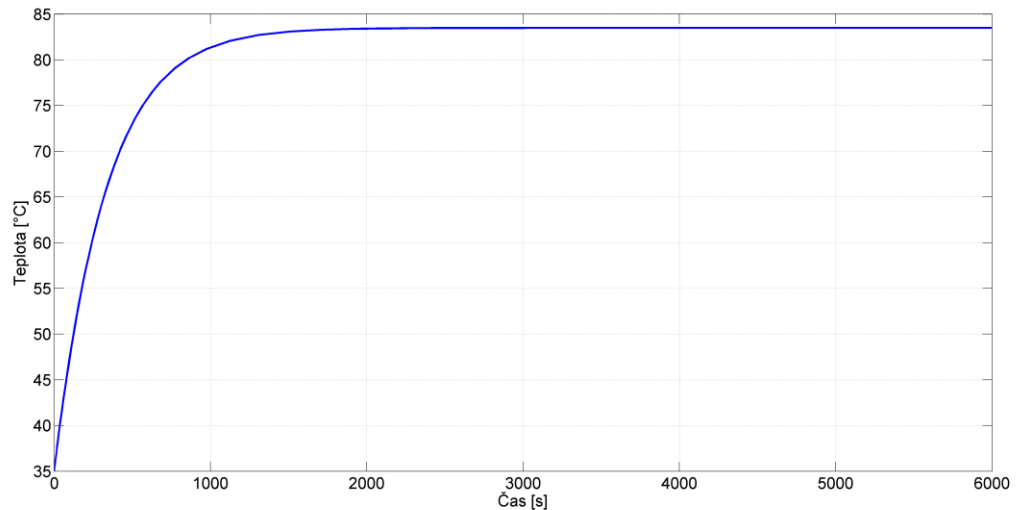


Obr. 4.12 Porovnání holého a izolovaného vodiče v Simulinku

V obou grafech je názorně vidět, že u izolovaného vodiče je podstatně delší doba ustálení přechodného děje, to je způsobené izolací. Zpočátku, kdy proud začne protékat vodičem, se vodič otepluje, jakmile dosáhne nejvyšší teploty, začíná teplo předávat do okolí. V případě izolovaného vodiče trvá ustálení teploty vzhledem k izolaci déle, vodič má větší plochu na oteplení celého vodiče, hůře se tedy ochlazuje, protože teplo musí překonávat vrstvu izolace. K oteplení dochází také vlivem slunečního záření, které prodlužuje dobu ustálení teploty.

4.5 Dynamický ohřev

V této části diplomové práce je simulován model AlFe lana, jehož parametry jsou získány z reálného modelu vodiče, který je vytvořen v programu Matlab/Simulink. AlFe je sláněný vodič s ocelovým jádrem a hliníkovým obalem, nosnou část zde tvoří železo a proudovodnou část tvoří hliník. Tímto lanem prochází proud 700 A, okolní teplota je 35°C, vnější průměr vodiče je 23,4 mm a intenzita slunečního záření je stanovena na 1000W/m². Tyto hodnoty vychází ze stejné normy jako v případě předchozích simulací. Z grafu (obr. 4.13) zobrazující přechodový stav je zřejmé, že teplota vodiče v ustáleném stavu má hodnotu 83,5°C, časová konstanta odečtená z grafu je stanovena na 500 s. Je zřejmé, že se jedná o nejhorší možný případ oteplení vodiče.

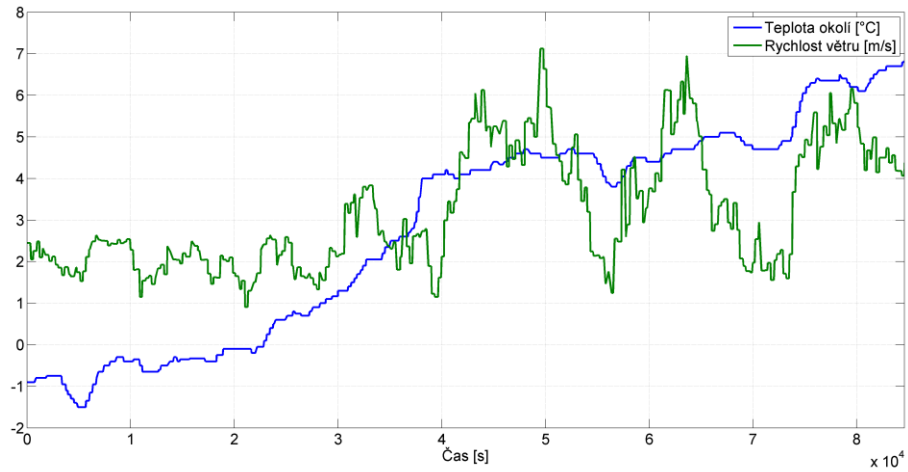


Obr. 4.13: Oteplovací charakteristika AIFe lana

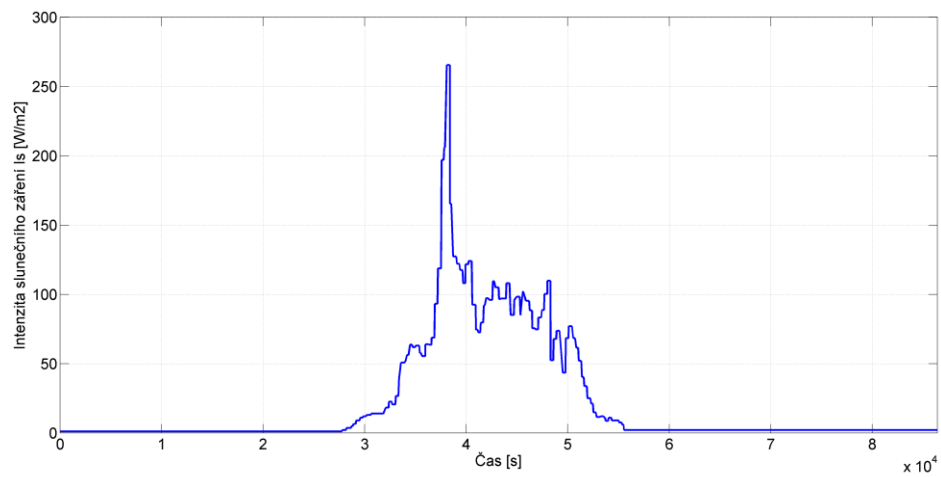
Model měření

Model AIFe lana jsem porovnávala s naměřenými hodnotami získanými z ČEPSu. Naměřené hodnoty nebyly konstanty, ale hodnoty časově proměnné. Do každého bloku jsem vložila hodnoty proudu, rychlosti větru, teploty okolí, intenzity slunečního záření závislé na čase.

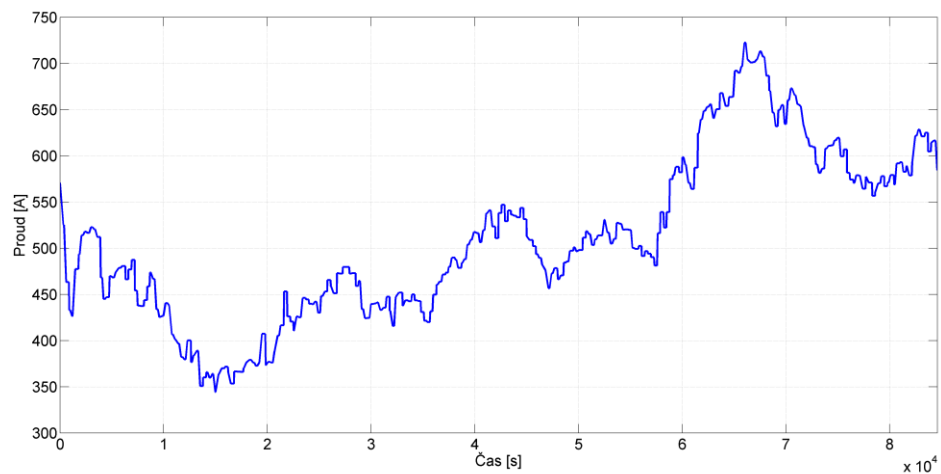
Nejprve jsem provedla simulace s průměrnými hodnotami měření a simulace pro nejhorší možný případ vycházející z měřených hodnot. Na obr. 4.14 jsou zobrazeny průběhy naměřených hodnot teploty okolí a rychlosti větru a na obr. 4.15 intenzity slunečního záření. Na následujícím obrázku 4.16 je zobrazen průběh proudu protékající vodičem. Tyto hodnoty jsou použity pro účely simulace.



Obr. 4.14: Průběh teploty okolí a rychlosti větru

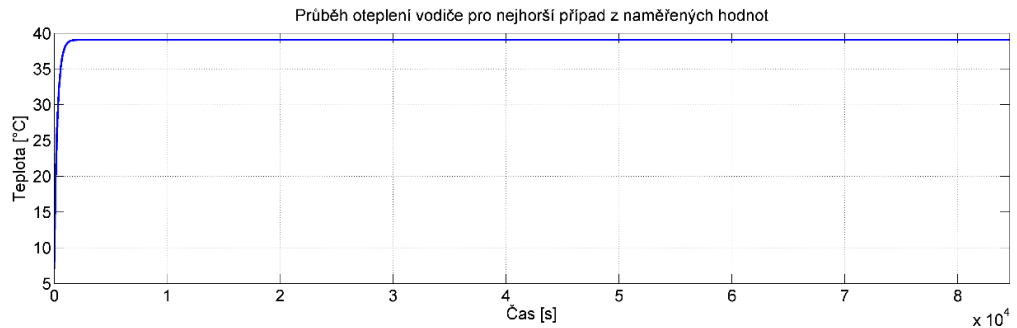


Obr. 4.15 : Průběh intenzity slunečního záření



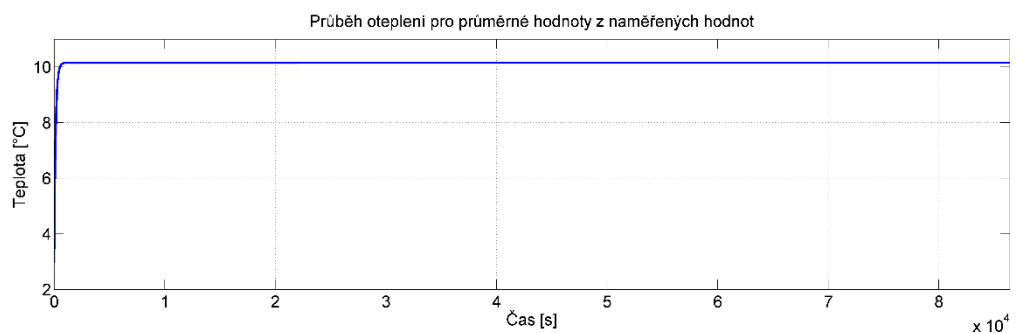
Obr. 4.16: Průběh proudu

Na obr. 4.17 je simulace pro nejhorší možný případ naměřených dat, tedy pro maximální proud (722,34A), maximální teplotu (7°C), nejvyšší intenzitu slunečního záření (265,5W/m²) a nejmenší rychlost větru (0,907m/s). Hodnota teploty dosahuje až 39,1 °C.



Obr. 4.17: Průběh oteplení pro nejhorší případ

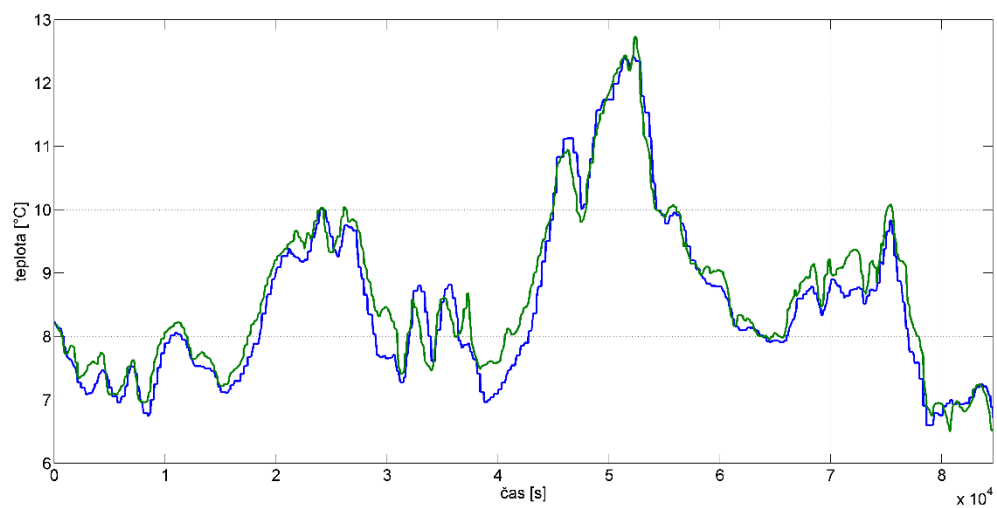
Na obr. 4.18 jsou zobrazeny výsledky pro průměrné hodnoty z naměřených dat, tedy pro proud (513,2 A), teplotu (2,95 °C), intenzitu slunečního záření (22,6 W/m²) a rychlost větru (3,19 m/s). Teplota dosahuje maximální hodnoty pouze 10,16°C.



Obr. 4.18: Průběh oteplení vodiče pro průměrné hodnoty

Vodič byl měřen v lednu, hodnoty okolní teploty se tedy pohybují kolem 0°C. Rychlost větru, která dosahuje dokonce až 7,12 m/s ochlazuje vodič podstatně více, než rychlost větru zadávána v předešlých simulacích (0,5 m/s).

Na obrázku 4.19 je porovnán průběh naměřené (modrá křivka) a nasimulované (zelená křivka) teploty v průběhu jednoho dne. Hodnoty se v některých bodech mírně liší, nicméně je vidět, že průběhy teplot sledují shodné trendy. Oba průběhy dosahují maximální hodnoty ve stejném čase a to přibližně 12,5 stupně. Příčinu odchylek není možné jednoduše analyzovat, mohou být způsobeny například rychlostí větru.



Obr. 4.19 : Průběh teploty během dne

Závěr

Tato diplomová práce se zabývá problematikou zatěžování vodičů venkovních vedení. Důvodem přetěžování linek venkovního vedení je připojování neregulovatelných obnovitelných zdrojů do sítě, proto vzniká nutnost zvyšování přenášeného výkonu linek. Je nutné, aby zvyšování zatížitelnosti linek bylo co nejúčinnější a nejúspornější z hlediska financí. Proto je v práci provedena analýza zatěžování holého a izolovaného vodiče. V první kapitole se zabývám možnými metodami pro zvýšení přenosové kapacity vedení. Mezi tyto možnosti patří výměna celé linky venkovního vedení nebo jednotlivých vodičů. Z důvodu vysokých nákladů je nutné ve většině případů řešit problém nedostatečné kapacity stávajících linek. Zde jsou představeny jednotlivé metody navýšení kapacity stávajících linek. Dle výsledného grafu na obr. 2.4 je zřejmé, že nejlevnější metodu představuje real-time monitoring, který využívá stávajících linek a sleduje průvěs a teplotu vedení. V další části práce byly vytvořeny simulace pro ohřev holých a izolovaných vodičů v programu Comsol Multiphysics, který je založen na principu řešení metodou konečných prvků. Byl zvolen holý a izolovaný vodič za okolních podmínek – intenzita slunečního záření, rychlost větru, okolní teplota daných normami. Výsledky simulace byly následně porovnány s výsledky simulačního modelu vytvořeného v programu Matlab/Simulink. Simulace byly provedeny pro ustálený a přechodový stav. Ze simulací je patrná delší doba ustálení teploty izolovaného vodiče, která za nejhorsích možných podmínek překročila limitní normu o $1,7^{\circ}\text{C}$. Je ukázáno, že přes vyšší chladicí povrch, který je dán větším průměrem izolací, převládá tepelně izolační schopnost PE a výsledná teplota je pro stejné jádro vyšší. Při záměně holého vodiče za izolovaný je nutné volit vyšší průřez vodiče.

V poslední části diplomové práce jsem vycházela z reálného modelu vedení. Měla jsem k dispozici naměřená data okolních podmínek proměnných v čase během jednoho dne, jednalo se tedy o dynamický model vedení. Provedla jsem simulaci z těchto hodnot, kterou jsem poté porovnávala s hodnotami naměřenými. Výsledkem byly dva téměř totožné průběhy. Odchyly mezi oběma průběhy mohou být způsobeny rychlostí větru nebo směrem působení větru na vodič. Je tedy možné konstatovat, že tento druh simulací je možné použít na dané vodiče. Dynamický model pro srovnání s měřenými hodnotami je možné označit za věrohodný.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] CIGRE J.W.G. B2.C1, Increasing Capacity of Overhead Transmission Lines: Needs and Solutions. CIGRE, 2010.
- [2] ČEPS, a.s. [online]. [cit. 2015-1-20]. Dostupné z: http://pandatron.cz/?1254&ceps_zada_o_pozastaveni_pripojovani_novych_zdroju_oze&mobile=1
- [3] Konference EGÚ, Ampacita vedení a možnost jejího on-line vyhodnocování, [online]. [cit. 2015-01-01]. Dostupné z: <http://www.ais-brno.cz/clanky/Ampacita.pdf?lang=cz>
- [4] TLUSTÝ, Josef, Jan KYNCL, Ladislav MUSIL, Jan ŠPETLÍK, Jan ŠVEC, Petr HAMOUZ, Zdeněk MÜLLER a Miroslav MÜLLER. Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [5] CIGRE W.G. 22.12, Thermal Behaviour of Overhead Conductors. CIGRE, 2002.
- [6] MERTLOVÁ, Jiřina, Pavla HEJTMÁNKOVÁ a Tomáš TAJTL. Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie. Vyd. 1. Plzeň: Vydavatelství Západočeské univerzity, 2008, 190s. ISBN 978-80-7043-307-2
- [7] Thermal Rate: Technical Information. Pike: Energy solution [online]. [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: <http://www.pike.com/EnergySolutions/ThermalRate/TechnicalInformation.aspx>
- [8] IEEE.ORG. The Differences between IEEE and CIGRE Heat Balance Concepts for Line Ampacity Considerations [online]. Wroclaw, Poland: Modern Electric Power Systems [cit. 2014-12-26]
- [9] CIGRÉ. Area-wide dynamic line ratings based on weather measurements [online]. [cit. 2014-12-26].
- [10] Review of Power cable standard rating Methods [online]. [cit. 2014-12-22]. Dostupné z: http://media.johnwiley.com.au/product_data/excerpt/97/04716790/0471679097.pdf
- [11] CIGRE W.G. B2.12 and I.C. on Large Electric Systems, Guide for Selection of Weather Parameters or Bare Overhead Conductor Ratings. CIGRE, 2006.
- [12] E.ON. Tiskové zprávy: Boom rozvoje fotovoltaických elektráren a stabilita přenosové a distribuční sítě musí být vyvážen. [online]. 16. 2. 2010 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/cs/o-spolecnosti/media/tiskove-zpravy/boom-rozvoje-fotovoltaickych-elektren-a-stabilita-prenosove-a-distribucni-site-musi-byt-vyvazene-34.shtml>
- [13] All for power: Informační portál a časopis: Plánujeme rozsáhlý program obnovy a modernizace vedení 400 kV. [online]. [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/planujeme-rozsahly-program-obnovy-a-modernizace-vedeni-400-kv/>
- [14] D.A. DOUGLASS, A. PHILLIPS, Daniel C. LAWRY, Abdel-Aty EDRIS, Earle C. BASCOM. Dynamic thermal ratings: monitors realize circuit load limit. IEEE Computer Application in Power 2000
- [15] KATEDRA GEOGRAFIE, Pedagogická fakulta, Masarykova univerzita. Sluneční záření: Intenzita slunečního záření [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: http://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/03-prvky.html
- [16] ZÁCHA, Pavel. FLUENT Přednášky: Turbulentní proudění [online]. [cit. 2015-

- 04-28]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/files/FLUENT%20-%20prednaska%203%20Zacha%20%28LS%202014%29.pdf>
- [17] MAYER, Daniel. Vybrané partie ze silnoproudé elektrotechniky. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2002, 250 s. ISBN 80-7082-925-7.
- [18] Vinter, P.: Měření ztrátového činitele silových kabelů. Elektro, 2001, č. 4. ISSN 1210- 0889 elektronická verze, www. Odbornecasopisy [online].[cit.2015-3-23]
- [19] <http://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu>.