

AMPACITA VEDENÍ A MOŽNOST JEJÍHO ON-LINE VYHODNOCOVÁNÍ

Antonín Popelka, Václav Böhm, Daniel Juřík, Petr Marvan - AIS spol. s r.o.

Moderní technologie měření synchronních fází umožňuje průběžně vyhodnocovat aktuální přenosovou schopnost vedení (ampacitu) s ohledem na zatížení vedení a meteorologické podmínky. Budou vysvětleny podmínky, omezení a principy metodiky a výsledky z experimentálních měření.

Aktuální bezpečné rezervy v přenosové kapacitě vedení je možné využít při řešení kritických situací v síti.

1. AMPACITA – PŘENOSOVÁ SCHOPNOST VEDENÍ

Problém ampacity neboli přenosové schopnosti vedení začal být aktuální na celém světě v souvislosti s velkými výpadky dodávky energie („black-out“) po roce 2000, prudkým rozvojem výroby velkých výkonů z odlehklých obnovitelných zdrojů (zejména větrné a solární) a potřebou přenášet tyto výkony na velké vzdálenosti, často přes lokální (národní) sítě, které na takové provozní poměry nebyly stavěny (trasa sever-jih v síti UCPTE). V některých případech se jednalo o lokální deficit výkonu, jehož náhrada z místních nouzových zdrojů je drahá ve srovnání s dálkovým přenosem.

Výstavba nových vedení, kromě dlouhé doby výstavby, byla navíc omezena

- ze strany vládních orgánů, problematika financování nových investic do sítí,
- nerespektováním strategických studií energetických společností v souvislosti s rozšiřováním proměnlivých a lokálně nově rozmístěných fotovoltaických a větrných elektráren,
- nepřipravenosti zajištění dlouhodobých úkolů v souvislosti s pozemky a životním prostředím (oproti zdrojům – zvláště jaderným - byl přenos energie sítěmi méně diskutován v zainteresovaných orgánech a s veřejností),
- ekologickými aktivitami (často si protiřečících), jejichž zvýšená aktivita se již dá očekávat,

Zvýšení nebo plné využití přenosových schopností sítí bylo a je potřebné jak v normálních, tak nově také i při havarijních stavech propojených sítí. Tato problematika byla v centru pozornosti odborné veřejnosti již před rokem 2002, kdy vznikaly i mezinárodní standardy CIGRE a IEEE pro matematické modely (např. [1]).

Definice:

Ampacita je maximální proud, který může přenášet vodič, aniž došlo k jeho bezprostřednímu nebo progresivnímu poškození.

Ampacita vodiče (vedení) je definována jako dovolené zatížení dané maximálním proudem, který může přenášet vodič, aniž došlo k narušení jeho funkce. Toto narušení je převážně dáno maximální dovolenou teplotou. Maximální přenášený proud není konstantní hodnotou jako dosud, ale je určován pro dané nepřekročitelné teploty vodiče v závislosti na okolních podmínkách – zejména teploty okolí a proudění větru.

Ampacita závisí především na:

- elektrických a mechanických vlastnostech materiálu vodičů,
- teplotních vlastnostech izolací (u kabelů),
- schopnosti rozptýlit uvnitř vodiče vznikající a z okolí přijímané teplo, která je závislá na geometrii a vlastnostech povrchu vodiče a jeho okolí,
- okolních povětrnostních podmínkách.

Ampacita je ovlivněna především tepelným stavem vodičů, neboť teplota určuje prodloužení vodičů a tím i průvės vedení nad terénem. Jelikož zjišťování průvěsu jako fyzikální veličiny je obtížné, zaměřují se aktivity na různé metody zjišťování teploty vodičů, z níž se pak odvozuje průvės. Tepelnou rovnováhu vodičů (přívod tepla = odvod tepla) je možno popsat následující rovnicí (jako jeden z možných matematických modelů – viz CIGRE, Technical Brochure 207: The thermal behaviour of overhead conductors, August 2002):

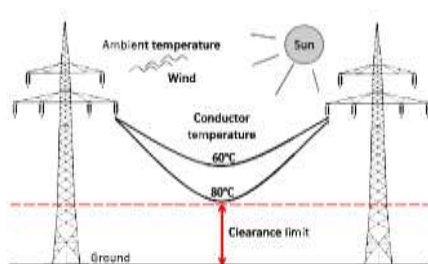


Figure 1: Clearance depending on ambient conditions and current

$$P_J + P_M + P_S + P_i = P_C + P_r + P_W$$

kde jsou

P_J – tepelné ztráty ve vodiči procházejícím proudem – Jouleovo teplo, $P_J = R \cdot I^2$

P_M – magnetické zahřívání od změny magnetického pole střídavého proudu,

P_S – solární záření,

P_i – zahřívání od koróny,

P_C – chlazení tepelnou konvekcí – vyzařováním,

P_r - radiační chlazení,

P_W – chlazení odpařováním vody.

Zahřívání korónou P_i , ochlazování odpařováním vody P_W a zahřívání změnou magnetického pole střídavého proudu P_M se v rovnici obvykle zanedbává a pak je:

$$P_J + P_S = P_C + P_r$$

Vlivem teploty vodiče se mění i jeho činný odpor podle známého vztahu:

$$R_t = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

kde α je teplotní koeficient odporu materiálu vodiče

a délka:

$$l_t = l_{20} \cdot (1 + \beta \cdot \Delta t)$$

kde β je teplotní koeficient délkové roztlačnosti materiálu vodiče.

Opačný vliv než teplota okolí má na ampacitu vítr, jeho rychlost a směr, svými chladivými účinky. Ty jsou ale podél vedení velmi proměnlivé vzhledem k zalomením a vlivu okolní infrastruktury (vršky, údolí, lesní porost). V trasách vedení by pak bylo možné najít kritická vedení (i když ta se během času mohou měnit při změnách energetické situace) a kritické úseky, kterým by, např. pro operativní sledování zatížitelnosti, měla být věnována zvýšená pozornost s pomocí některé z dále uváděných metod.

V souvislosti se zvýšením proudového zatížení je samozřejmě kontrolovat i související přístrojové vybavení vedení.

Celá problematika zvýšení přenosových schopností vedení (sítí) obecně má dva okruhy problémů:

1. **zvýšení přenosové schopnosti** vedení kvůli potřebě přenesení vyššího výkonu v dané trase systémovými změnami a přístupy nebo rozsáhlými příp. i podstatnými mechanickými nebo elektrickými úpravami vedení,
2. operativní zjišťování okamžitých kritických parametrů (teplota a průvės) pro umožnění zatížení až na technologické meze bez výrazných nebo nákladných úprav stávajících vedení – **monitorování zatížitelnosti**.

2. STÁVAJÍCÍ METODY

Pro stanovení teploty vodičů se vychází z energetické – tepelné bilance ve vodiči. V normě [1] je popsán princip metody pro výpočet teploty vodičů a stanovení ampacity z meteorologických údajů. Vstupem jsou teplota okolí, geografická poloha vedení (pro určení slunečního osvětlení), síla a směr větru. Parametry výpočtu jsou předpokládány vlastnosti vodičů: schopnost absorpce slunečního záření a koeficient přestupu tepla na povrchu vodiče.

V ustáleném stavu musí být v rovnováze energie zvyšující teplotu vodiče a množství energie odvádějící teplo z vodiče:

$$q_s + R \cdot I^2 = q_c + q_r \quad (1)$$

kde q_s – energie slunečního ohřevu

$R \cdot I^2$ - ohřev procházejícím proudem

q_c – energie přestupu tepla z vodiče do okolí závislá na okolní teplotě a větru

q_r – energie tepelného vyzařování.

Většina členů rovnice je parametricky závislá na teplotě vodiče.

Chování a průběh teploty v přechodném stavu je simulováno modelem s jednou časovou konstantou:

$$\frac{dT}{dt} = k * [q_s + R(T) * I^2 - q_c - q_r] \quad (2)$$

Tato metoda je implementována v mnohých programech používaných při konstrukci a hodnocení vedení, např. LINEAMP nebo ETAP.

Přesnost metody a tím její použitelnost je limitována množstvím odhadovaných parametrů a konstant. Proto se hledají metody, které umožní přímé měření teploty vodičů. Jejich přehled je v referátu [2].

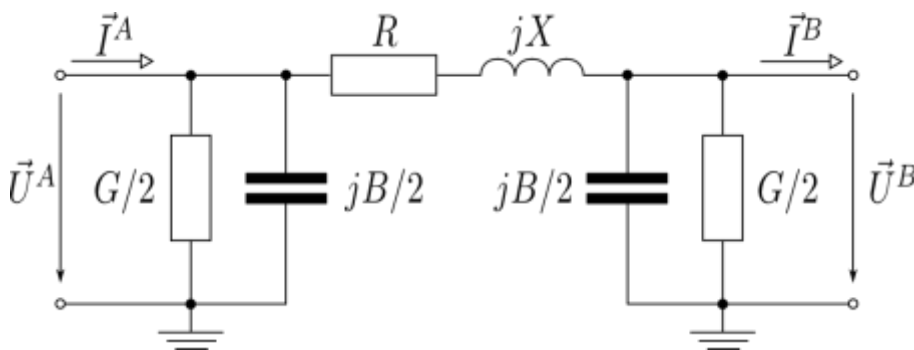
V následujícím popíšeme použití měření synchrofázorů napětí a proudů v systémech WAMS.

3. MĚŘENÍ AMPACITY V SYSTÉMECH WAM

Přesná časová synchronizace pomocí GPS umožnila vyvinout zařízení pro zcela současné – synchronní měření elektrických veličin kdekoli na světě. Měřicí přístroje označované jako PMU (Phasor Measurement Units) vyhodnocují vektory napětí a proudu (amplitudu a úhel natočení vektoru) měřené ve stejný okamžik ve všech místech. Takto zjištěné veličiny se nazývají synchrofázory. Synchrofázory jsou základem systémů nazývaných Wide Area Monitoring (WAMS).

Technologie synchrofázorů přináší přesný pohled na stav a chování soustavy, umožňuje realizovat množství nových a přesnějších funkcí na podporu rozvoje sítě, analýzu chování sítě zvl. při netypických stavech a na podporu operativního řízení soustavy. Významným přínosem je také on-line vyhodnocování stability sítě a zjišťování tzv. předkritických a kritických stavů.

Synchrofázory napětí a proudů měřené na obou stranách vedení umožňují on-line počítat parametry vedení. Použijeme model vedení π -článek:



Podélná impedance vedení je

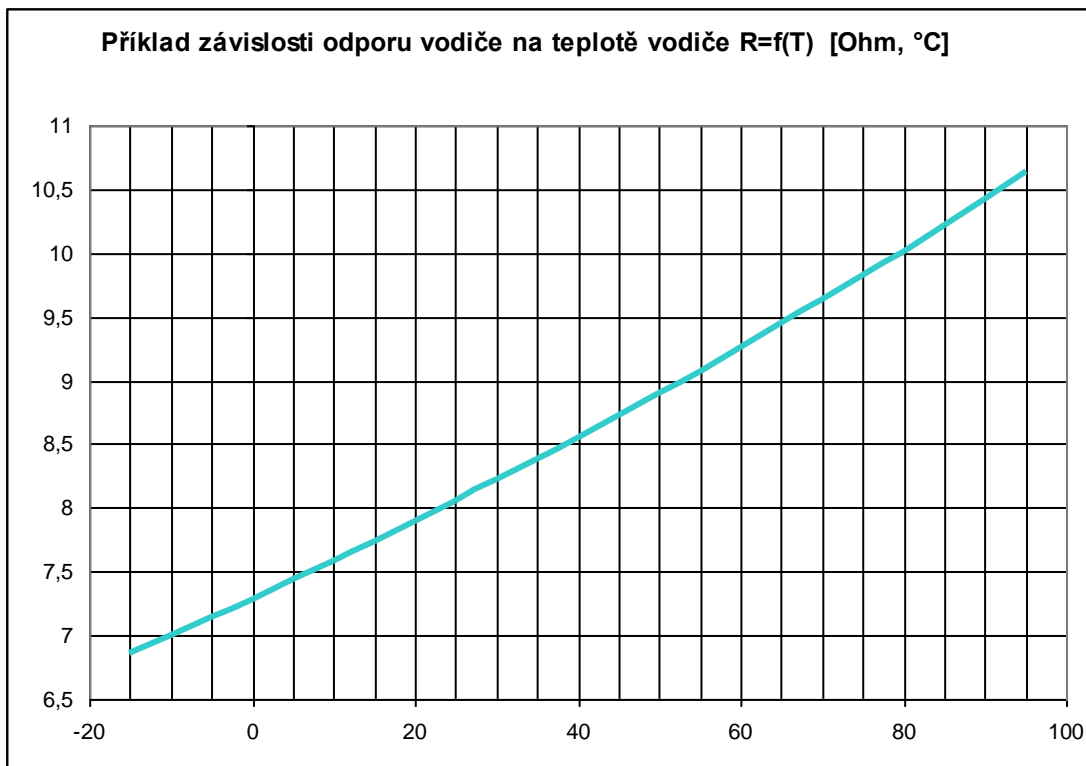
$$Z_{\text{vedení}} = R + jX = \frac{U_B^2 - U_A^2}{U_A * I_B + U_B * I_A} \quad (3)$$

Napětí i proudy v rovnici jsou komplexní čísla a představují synchrofázory těchto veličin. Velikost podélného odporu vedení R je zcela jednoznačně funkcí aktuální průměrné teploty vedení.

$$T = f(R) \quad (4)$$

$$R_1 = R_0 * (1 + \alpha * \Delta T)$$

Teplotní koeficient odporu α je dán materiálem vodičů a pro dané vedení se s časem nemění. V grafu je použita konstanta pro hliník.



Pokud určíme velikost a změny odporu, můžeme podle nich jednoznačně stanovit průběh průměrné teploty celého vedení.

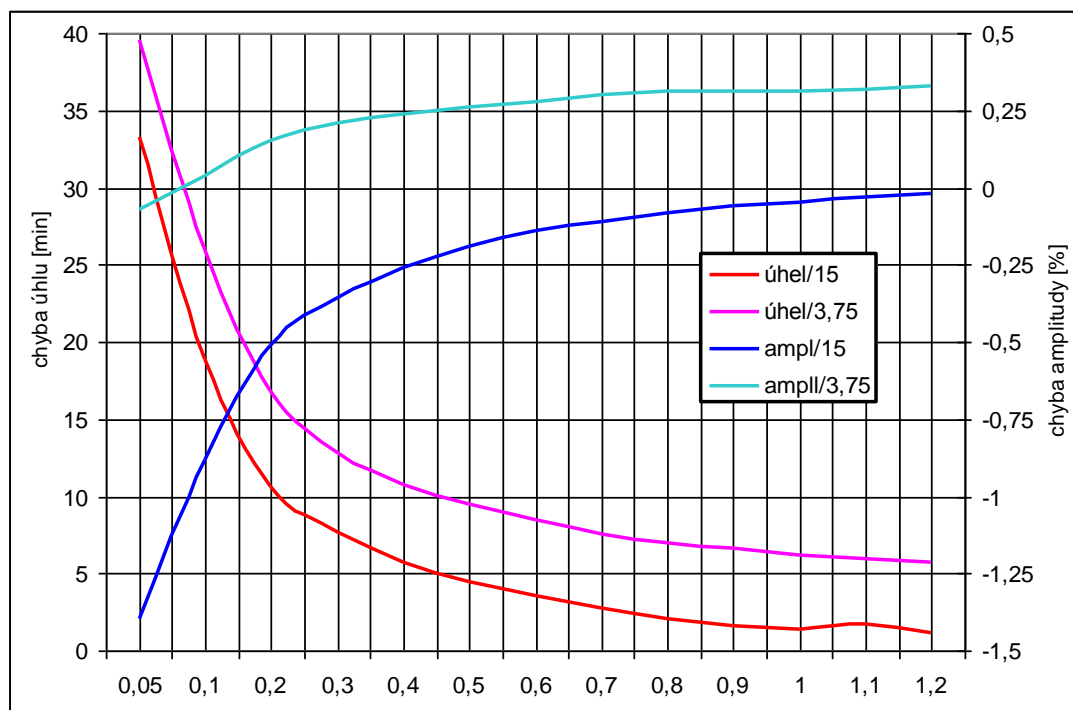
4. PŘESNOST, CHYBY A KOREKCE

Přesnost vypočtených parametrů vedení je závislá na přesnosti měření synchrofázorů. Měřicí řetězec zahrnuje přístroje PMU a měřicí transformátory napětí a proudu.

Vlastní přístroje PMU obvykle měří úhel s přesností na $0,1^\circ$ a amplitudu s přesností $0,2\%$ ze jmenovité hodnoty. Z chybových hodnot se počítá chyba vektoru zvaná TVE (Total Value Error), která se pohybuje kolem $0,5\%$. Tyto chyby je možné kalibrací PMU zlepšit o jednu třídu přesnosti.

Maximální chyby měřicích transformátorů jsou definovány normami [3], [4]. U proudových měničů v rozsahu 80 až 120% jmenovité hodnoty odpovídají chyby třídě přesnosti, pro nižší hodnoty jsou větší.

Pro ilustraci jsou na grafu příklady chyby měřicích transformátorů napětí i proudů změřené na vzorcích v autorizované zkušebně.



Napětí se obvykle měří mezi fázemi a nulovým vodičem, tj. v oblasti kolem 58% jmenovité hodnoty. Díky tomu, že napětí se pohybuje blízko této hodnoty, zůstává chyba MTU konstantní během provozu.

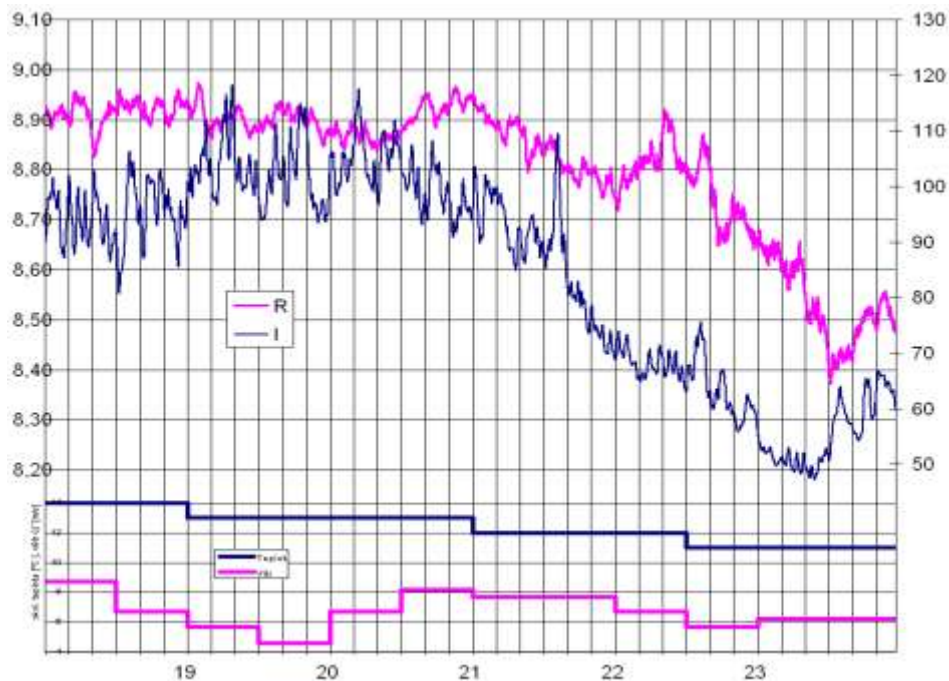
Zcela jiná situace je při měření proudů. Rozsahy měřicích transformátorů bývají dimenzovány s rezervou nad předpokládaný maximální provozní proud vedení. Provozní zatížení vedení se obvykle pohybuje od nuly do 80% jmenovitého proudu vedení. Není neobvyklé, že zatížení vedení se téměř trvale pohybuje v rozsahu do 20% jmenovité hodnoty měřicího transformátoru. Je zřejmé, že výsledky měření synchrofázorů nejsou bez korekce převodu transformátorů použitelné pro přesný výpočet odporu vodiče.

Pro korekci chyb měřicích transformátorů byla použita estimace průběhu chyby výpočtu parametrů při různých provozních podmínkách vedení. Podkladem je dlouhodobé měření synchrofázorů napětí a proudů na obou koncích vedení. Výsledkem je matematický model systematické chyby měření v závislosti na amplitudě veličiny. Z několika modelů se osvědčil vztah

$$e = a + b * A + \frac{c}{d + A} \quad (5)$$

kde a, b, c, d jsou korekční koeficienty
 A je amplituda.

Na dalším grafu je průběh odporu vedení a proudu vedením během 6-ti hodinového měření na vedení 110kV. Podkladem pro výpočet podélné impedance byly synchrofázory napětí a proudů korigované dle vztahu (6). Graf je doplněn průběhem teploty a rychlosti větru.



5. MODEL, AKTUÁLNÍ AMPACITA, PŘEDPOVĚĚ

Pro analýzu dynamické odezvy teploty byl navržen model

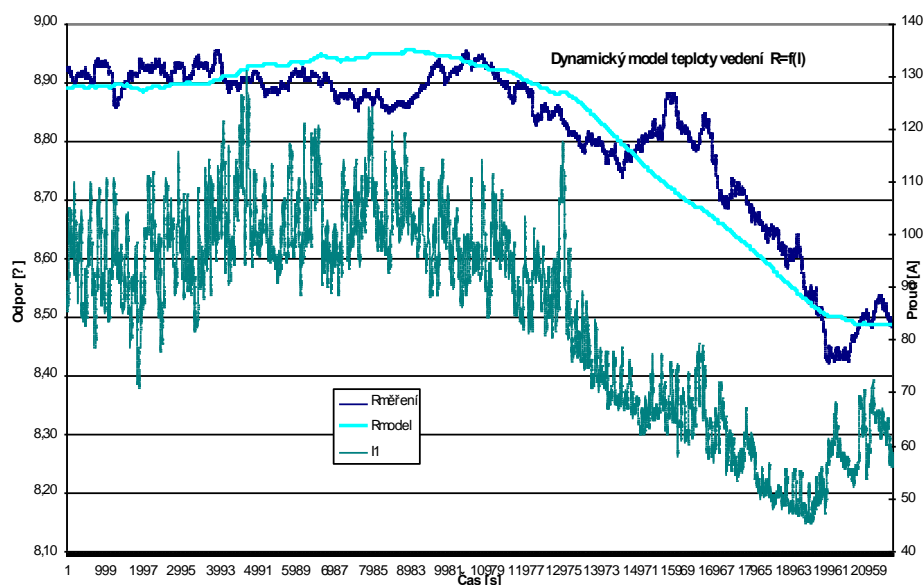
$$T \approx R = f(I, T_{\text{okolí}}, v_w) \quad (6)$$

kde v_w je rychlost větru ve směru kolmém na vedení.

V modelu nebyl zohledněn vliv slunce, protože jsme neměli podklady o osvětlení během experimentu.

Pro každou proměnou byly časové konstanty a vlivnost vyhodnocovány samostatně.

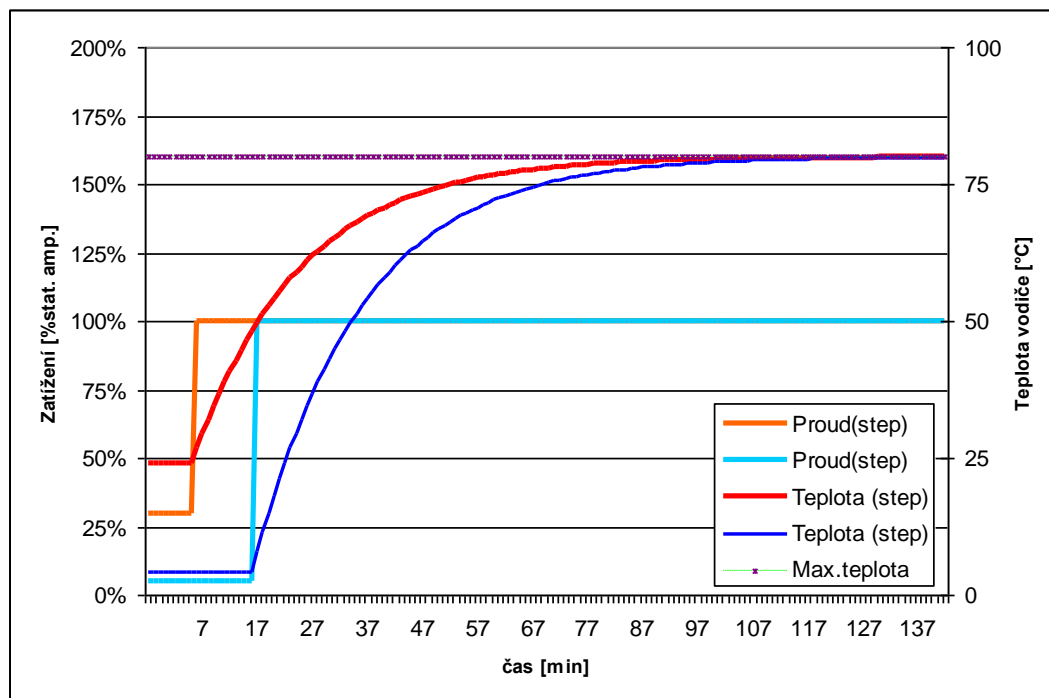
Průběh odporu vypočítaného ze synchrofázorů a z modelu jsou na následujícím grafu.



Pro přiřazení teploty k velikosti odporu je třeba mít k dispozici měření ve větším rozsahu okolních teplot a proudů. Ke konci roku připravujeme uvést do provozu trvalé měření synchrofázorů na několika vedeních, po vyhodnocení budeme mít relevantní výsledky.

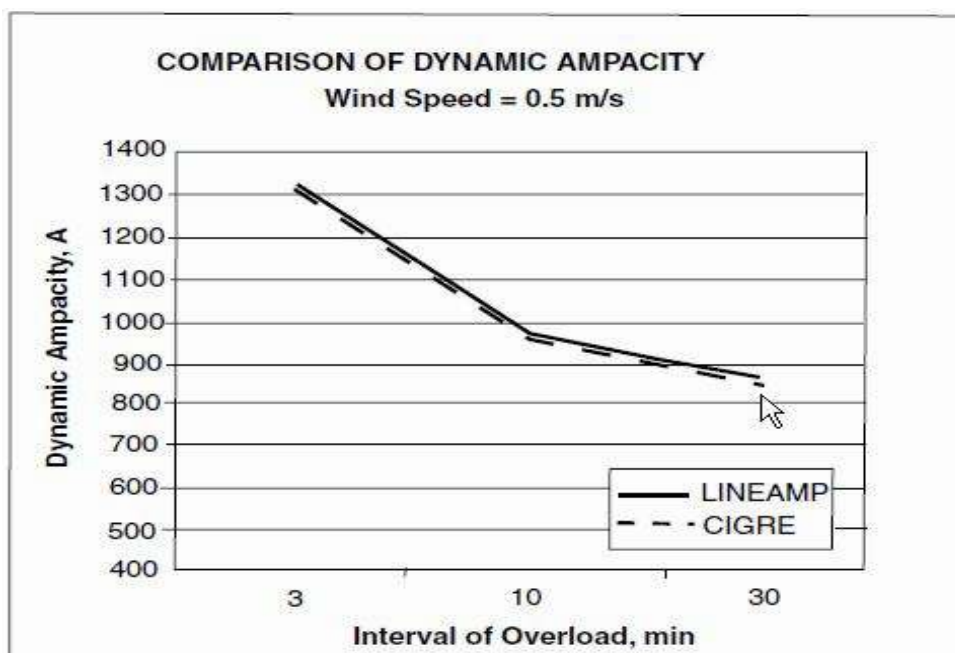
V následujících grafech se předpokládá limitní teplota vodičů $T_{max} = 80^\circ\text{C}$.

Velikost proudu, která způsobí oteplení v ustáleném stavu na teplotu T_{max} , se nazývá statická ampacita.

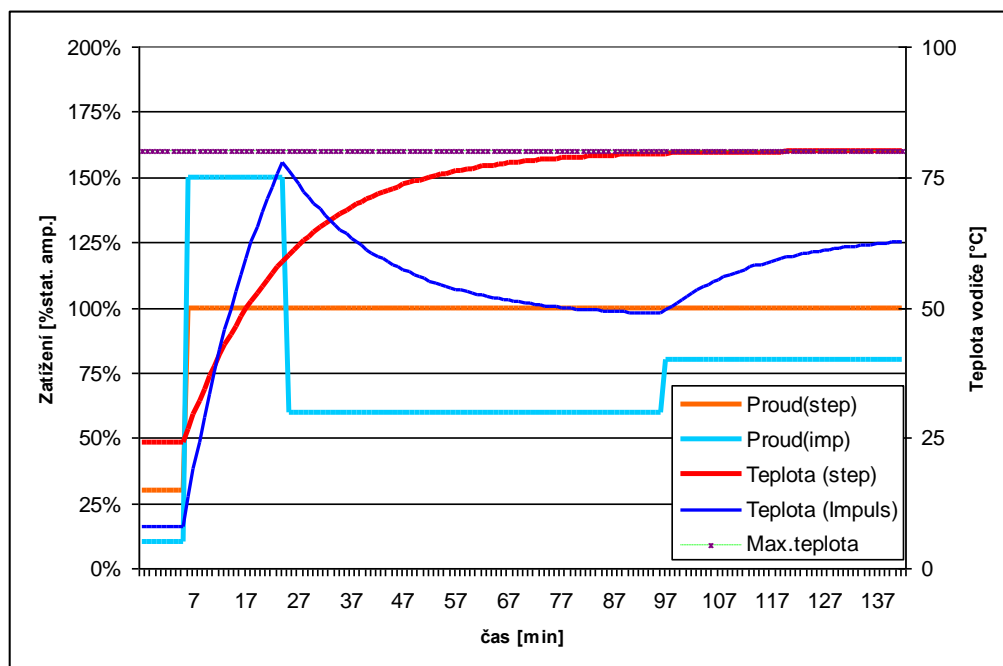


Na grafu jsou znázorněny dvě skokové změny proudu z různých původních hodnot na velikost statické ampacity. Teplota vedení postupně dosáhne maximální teploty. Statická ampacity se stanoví z poměru limitního odporu k odporu vedení a z velikosti procházejícího proudu. Závisí na meteorologických podmínkách, které není nutné měřit.

Protože vedení vykazuje tepelnou kapacitu, je možné ji využít ke krátkodobému přetížení vedení tak, aby teplota nepřekročila povolenou úroveň. Tato dynamická ampacity je vztahena k době přetížení. Graf je převzat z [6]:



Průběh zatěžovacího proudu a teploty vedení z modelu je znázorněn na dalším grafu. Je zde využito krátkodobého přetížení na 150% statické ampacity po dobu 18 minut. Teplota se k povolené hodnotě pouze přiblíží.:



6. SHRnutí

Systémy Wide Area Monitoring umožňují průběžné vyhodnocování statické i dynamické ampacity. Správné nastavení modelu vyžaduje provést dlouhodobější měření v rozsahu 0-100% zatížení vedení za současného mapování meteorologických podmínek.

Přínosy popsané metody:

- V přímém měření odporu vedení.
- Průběžné stanovení **skutečné rezervy** v zatížení vedení – statická ampacity.
- Vyhodnocení možnosti **krátkodobého přetížení** vedení použitelného při řešení kritických situací.

Uvedené výsledky byly získány na základě krátkodobého měření na jednom vedení 110kV.

Do konce roku 2010 připravujeme zprovoznění zkušebního měření synchronfázorů na několika vedeních 110kV. Data použijeme pro další rozvoj a ověření metodiky výpočtu parametrů vedení a stanovení aktuální statické a dynamické ampacity.

Práce byla prováděna v rámci projektu FR-TI1/462 podporovaného Ministerstvem průmyslu a obchodu.

7. LITERATURA

- [1] IEEE Standard for Calculation the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, IEEE Std 738-1993
- [2] Ampacita elektrických vedení, Böhm Václav, Popelka Antonín, Vostracký Zdeněk, sborník CIRED 2010, Tábor
- [3] Přístrojové transformátory – část 1: Transformátory proudu, ČSN-EN 60044-1

- [4] Přístrojové transformátory – část 2: Transformátory napětí, ČSN-EN 60044-2
- [5] Design and calculation Method for Dynamic Increasing Transmission Line Capacity, Lijie Ren, Xiuchen Juany, Gehao Sheng, Wu Bo, WSEAS Transactions on Circuits and Systeme, May 2008
- [6] PowerLine Ampacity System, Anjab Deb, CRC Press, Washington D.C. 2000