

# Modelování spínacích přechodných dějů na přenosovém vedení ZVN/VVN

Tomáš Nazarcík  
Katedra teoretické elektrotechniky  
Fakulta elektrotechnická  
Západočeská univerzita v Plzni  
nazarcik@kte.zcu.cz

## Modelling of Switching Transients on EHV/HV Transmission Line

**Abstract** – This paper is concerned with the modelling of the switching transients on the multi-circuit EHV/HV transmission line. On the created two-port model the calculations were performed. The influence of the line switching of some circuits on the remaining circuits was analysed.

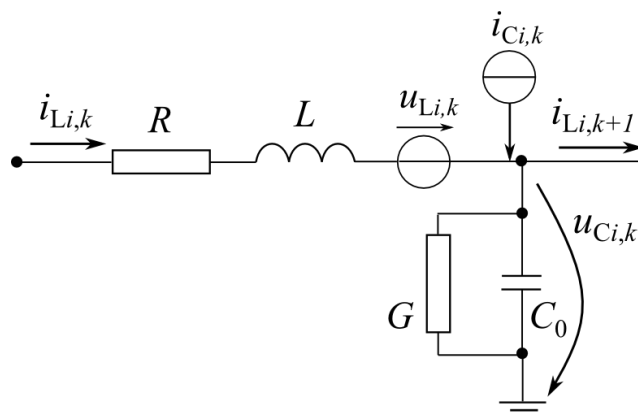
**Keywords** – Cascade of Two-ports; Line Switching; Mutual couplings; Transients.

### I. ÚVOD

Vícenásobná vedení, nesoucí vodiče různých napěťových hladin na jednom stožáru, se zpravidla konstruují jako netransponovaná. Důvodem je komplikované technické řešení samotné transpozice a kratší délka vedení. Na tomto vedení induktivní a kapacitní vazby mezi vodiči způsobují vzájemné ovlivňování mezi jednotlivými potahy. V tomto článku bude zkoumán vliv zapínání linek ZVN na linky VVN, které jsou v provozu.

### II. DVOJBRANOVÝ MODEL VEDENÍ

Fázové vodiče obou napěťových hladin byly modelovány jako kaskáda  $N$  gamma článků. Elementární dvojbran obsahuje obvyklé pasivní parametry  $R$ ,  $L$ ,  $C_0$  a  $G$  [1],[2]. Pro respektování indukovaného napětí v rámci induktivních vazeb a indukovaného proudu v rámci kapacitních vazeb je nutné doplnit napěťový a proudový zdroj (1), (2) – viz. Obr. I:



**Obrázek I.** Základní gamma element  $k$ -tého dvojbranů kaskády  $i$ -tého vodiče

$$u_{Li,k} = \sum_{j=1, i \neq j}^{n+m} L_{ij} \frac{di_{Lj,k}}{dt} \quad (1)$$

$$i_{Ci,k} = \sum_{j=1, i \neq j}^{n+m} C_{ij} \left( \frac{du_{Cj,k}}{dt} - \frac{du_{Ci,k}}{dt} \right) \quad (2)$$

$L_{ij} / C_{ij} \dots$  vzájemná indukčnost / kapacita mezi  $i$ -tým a  $j$ -tým vodičem  
 $i_{L,j,k} \dots$  proud  $j$ -tého vodiče v  $k$ -tém dvojbranu  
 $u_{C,i,k} / u_{C,j,k} \dots$  napětí vůči zemi  $i$ -tého/ $j$ -tého vodiče  $k$ -tého dvojbranu

Zemnicí lana byla modelována jako dvojbrany bez kapacity a svodu vůči zemi. Zem byla respektována dle Ruddenbergovy teorie odporem  $R_g$  a indukčností  $L_g$  v sérii a je v modelu paralelně vůči zemnicím lanům.

### III. MATEMATICKÝ POPIS DVOJBRANOVÉHO MODELU

Přímo aplikací Kirchhoffových zákonů na jednotlivé smyčky a uzly dvojbranového schématu získáme systém obyčejných diferenciálních rovnic (ODR). Uvažujeme-li obecně  $n$  fázových vodičů (ZVN a VVN dohromady) a  $m$  zemnicích lan, obdržíme  $(n+m)$  kaskád každou obsahující  $N$  dvojbranů. V každém dvojbranu fázového vodiče jsou dvě stavové veličiny ( $i_L$  a  $u_C$ ), v každém dvojbranu zemnicích lan a země je jen jedna stavová veličina. Celkový počet diferenciálních rovnic se rovná  $M = N * (2*n + m + 1)$ . Pro řešení v MATLABu je nutné soustavu ODR přepsat do následující maticové podoby [3]:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{f} \quad (3)$$

$\mathbf{x} (M, 1) \dots$  sloupcový vektor stavových proměnných

$\mathbf{A} (M, M) \dots$  matice stavové proměnné

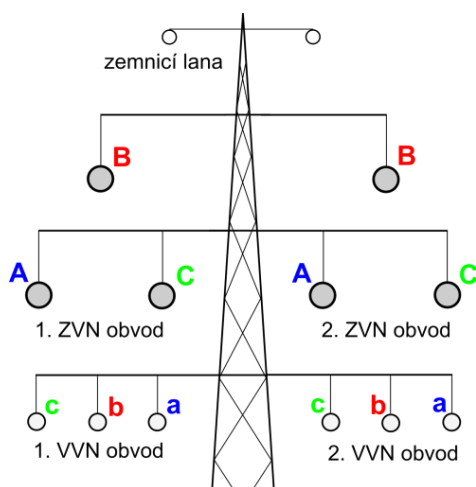
$\mathbf{f} (M, 1) \dots$  sloupcový vektor zdrojů

Protože jednotlivé diferenciální rovnice soustavy ODR (3) obsahují více členů s derivacemi stavových proměnných (důsledek induktivních a kapacitních vazeb), je nutné separovat členy s derivacemi na jednu stranu rovnice, členy bez derivace pak na stranu druhou (4). Finální tvar maticové rovnice se získá násobením rovnice inverzní maticí  $\mathbf{A}_1$  zleva (5):

$$\frac{d}{dt} \mathbf{A}_1 \mathbf{x} = \mathbf{A}_2 \mathbf{x} + \mathbf{f} \quad \rightarrow \quad \frac{d}{dt} \mathbf{x} = \mathbf{A}_1^{-1} (\mathbf{A}_2 \mathbf{x} + \mathbf{f}) \quad (4), (5)$$

$\mathbf{A}_1 / \mathbf{A}_2 \dots$  matice s koeficienty u členů s derivacemi/bez derivací

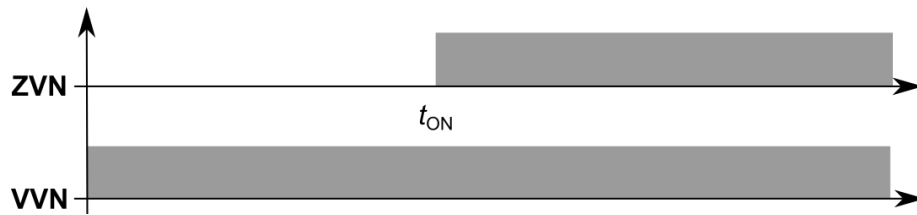
### IV. ILUSTRATIVNÍ PŘÍKLADY VÝPOČTŮ



**Obrázek II. Stožár Donau a konfigurace fází**

Pro výpočty bylo uvažováno čtyřnásobné vedení  $2 \times 400 \text{ kV} + 2 \times 110 \text{ kV}$  o délce 20 km. Typ stožárové konstrukce odpovídá typu Donau, která má vodiče vyšší napěťové hladiny umístěny do trojúhelníka v horní části stožáru. Pod nimi jsou v horizontální linii umístěny vodiče nižší napěťové hladiny. Z důvodu komplikovanosti stožárové konstrukce byla uvažována zcela netransponovaná varianta vedení, u které vzájemné induktivní a kapacitní vazby mají nezanedbatelný vliv. Na základě doporučení pro optimální rozložení EMP byla uvažováno asymetrické rozmístění fází viz. obr. II. Řešením maticové rovnice (5) je možno získat časový průběh všech stavových veličin.

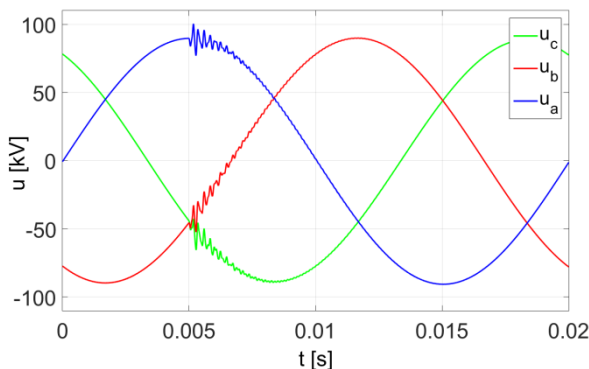
V tomto článku je zkoumáno vzájemné ovlivňování mezi jednotlivými linkami během jejich spínání. Předchozí výzkum prokázal, že vliv linek ZVN na linky VVN je výraznější, než v opačném směru. Proto bude pro další zkoumání uvažována situace, kdy jsou obě linky VVN v provozu. Obě linky ZVN jsou na počátku vypnuté a v čase  $t_{ON}$  dojde k jejich sepnutí. To je naznačeno na spínacím diagramu na Obr. III.



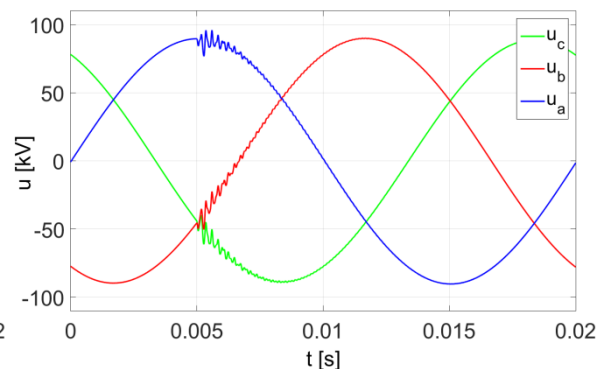
**Obrázek III. Spínací diagram ZVN a VVN linek**

Vliv zapnutí linek ZVN bude zkoumán pro různé časy jejich zapnutí  $t_{ON}$ . Pro vzájemné porovnání budou prezentovány získané vybrané časové průběhy napětí a proudů linek VVN a proudů v zemnicích lanech a zemi.

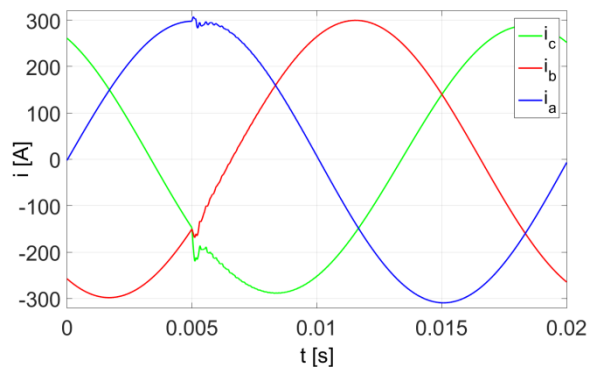
- čas sepnutí linek ZVN  $t_{ON} = 0.005$  s



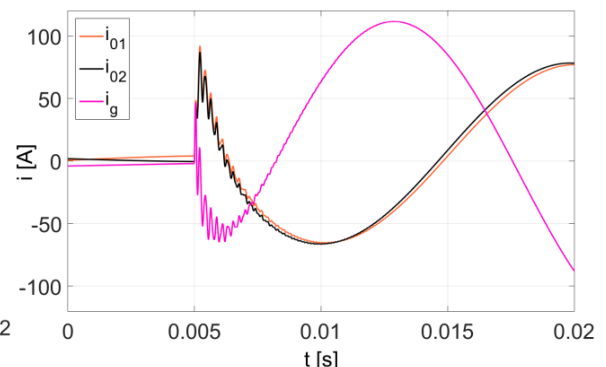
**Obrázek IV. Napětí vodičů 1. VVN linky**



**Obrázek V. Napětí vodičů 2. VVN linky**



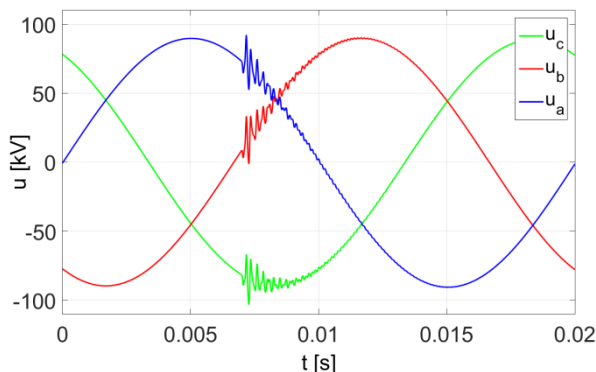
**Obrázek VI. Fázové proudy 1. VVN linky**



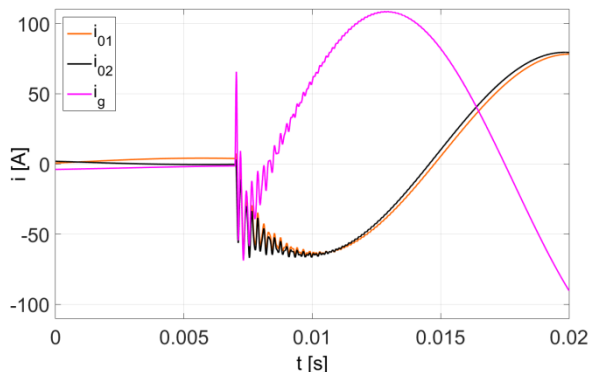
**Obrázek VII. Průběhy proudů v zemnicích lanech a zemi**

Průběhy napětí VVN obou linek se příliš od sebe neliší, u 1. linky je však možné pozorovat výraznější oscilační špičky ve fázi *a*. Nejvyšší oscilační špičky dosahují hodnoty přibližně 10 kV což s ohledem na amplitudu napětí odpovídající 89,81 kV činí víc než 10 %. Obr. VI ukazuje, že ovlivnění proudových poměrů na VVN není tak výrazné. Z Obr. VII vyplývá, že pokud jsou linky ZVN vypnuté, zemnicími lany a zemí prochází jen velmi malý proud. Zapnutí ZVN linek je doprovázeno kmitavým nárůstem proudu v zemnicích lanech, který se následně harmonicky ustálí, což je dáno geometrickou nesymetrií vodičů ZVN vůči zemnicím lanům. Pro další uvažované časy sepnutí ZVN budou zobrazeny jen napětí vodičů 1. VVN linky a proudy zemnicích lan.

- čas sepnutí linek ZVN  $t_{ON} = 0.007$  s

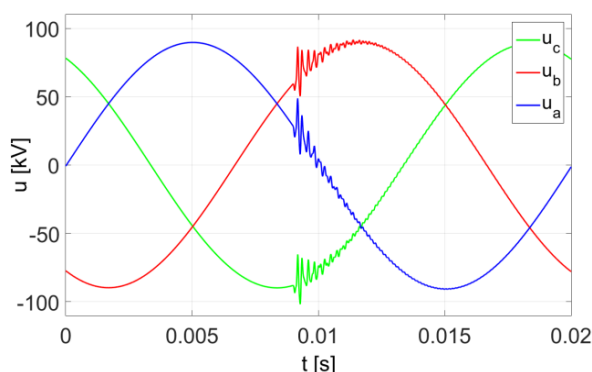


**Obrázek VIII.** Napětí vodičů 1. VVN linky

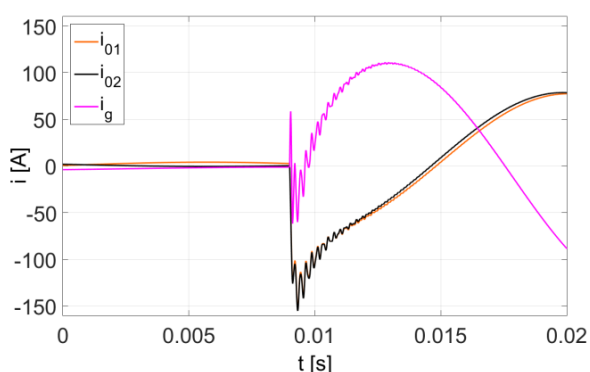


**Obrázek IX.** Proudy v zemnicích lanech a zemi

- čas sepnutí linek ZVN  $t_{ON} = 0.009$  s



**Obrázek X.** Napětí vodičů 1. VVN linky



**Obrázek XI.** Proudy v zemnicích lanech a zemi

## V. ZÁVĚR

Spínání linek ZVN je doprovázeno zejména oscilačními přepětovými špičkami v linkách VVN. To z dlouhodobého hlediska může negativně působit na izolaci výkonových VVN transformátorů. Tyto přepětové špičky také nepříznivě ovlivňují kvalitu elektrické energie na hladině VVN [4]. Zapnutí linek ZVN má za následek naindukování proudu do obou zemnicích lan. Průběh tohoto proudu, se po odeznění přechodného děje na počátku, ustálí na specifické hodnotě.

## PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory interního projektu na podporu studentských vědeckých konferencí SVK-2017-008 a projektu SGS-2015-035.

## LITERATURA

- [1] Benešová, Z., Mayer, D.: „Algorithm for computation of inductances of three/phase overhead lines“, AMTEE'03 Plzeň: ZČU v Plzni 2003
- [2] Benesova, Z., Sroubova, L.: “Capacitive Coupling in Double-Circuit Transmission Lines”, Advances in Electrical and Electronic Engineering, Zilina 2004
- [3] [https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode45.html?searchHighlight=ode45&\\_tid=doc\\_srchtile](https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode45.html?searchHighlight=ode45&_tid=doc_srchtile). Dostupné online 21. 9. 2017.
- [4] Norma ČSN EN 50 160 – „Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí“, 3. vyd. Praha: ÚNMZ, 2011.