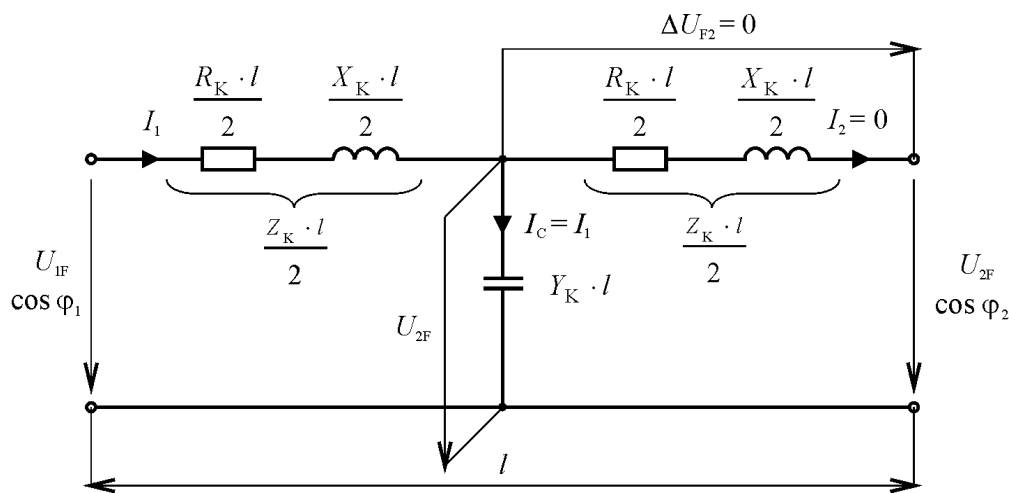


Ferrantiho jev, vlnová impedance a přirozený výkon vedení

Ferrantiho jev

Jedná se o jev, kdy napětí na konci vedení je větší než na jeho začátku. Nastává u dlouhých nezatížených vedení (stav naprázdno) nebo jen málo zatížených vedení vvn a zvn. Jedná se o formu provozního přepětí.

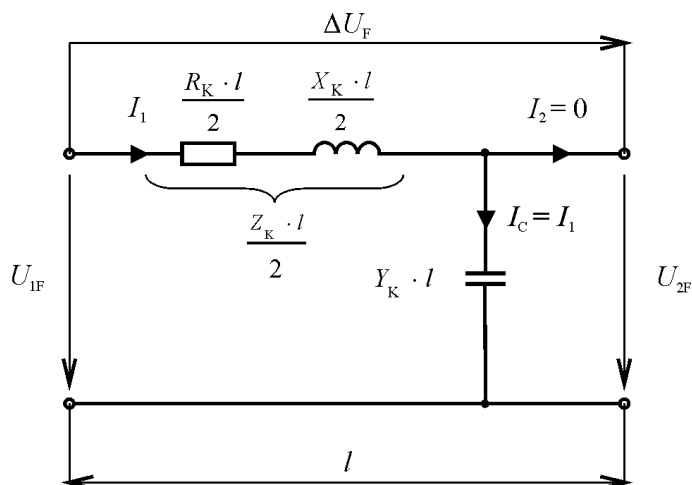
Při odvození velikosti přepětí vycházíme vzhledem k délce vedení z T – článku.



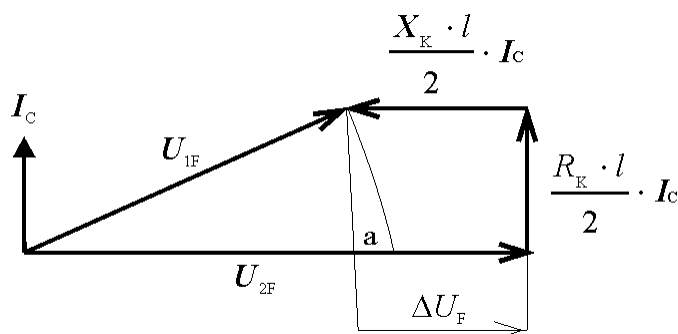
Protože při chodu vedení naprázdno není na konci připojen odběr, je $I_2 = 0$. Proto můžeme zanedbat pravou část podélné impedance, na které je nulový úbytek napětí ($\Delta U_{F2} = 0$). Na příčné admitanci $Y_K \cdot l$ je tedy přímo napětí U_{2F} .

Vzhledem k tomu, že zanedbáváme činnou složku příčné admitance ($G_K = 0$), protéká při chodu vedení naprázdno příčnou větví čistě kapacitní proud I_C , který současně protéká levou částí podélné impedance. Platí tedy, že $I_1 = I_C$. Vedením protéká pouze tzv. nabíjecí proud vedení I_C .

Protože pravou část T – článku nemusíme uvažovat, lze náhradní schéma vedení upravit:



Fázorový diagram:



Z diagramu je vidět, že napětí na konci vedení je větší než na jeho začátku. Na vedení vznikne místo úbytku přírůstek napětí (záporný úbytek napětí).

Pokud uvažujeme kolmý průmět, tj. zanedbáme úsek a, který vznikne přenesením fázoru U_{1F} do kladné osy reálných čísel, rozdíl mezi napětím na konci a na začátku (přírůstek napětí) je přibližně:

$$\Delta U_F = U_{2F} - U_{1F}$$

Z diagramu je také vidět, že přibližně platí:

$$\Delta U_F = 0,5 \cdot X_K \cdot l \cdot I_C$$

Odvození vztahu pro ΔU_F :

$$\begin{aligned} \Delta U_F &= 0,5 \cdot X_K \cdot l \cdot I_C = 0,5 \cdot \omega \cdot \underbrace{\left(0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r} + 0,05\right) \cdot 10^{-3}}_{\tilde{X}_K} \cdot l \cdot \underbrace{U_{2F} \cdot Y_K \cdot l}_{I_C} = \\ &= 0,5 \cdot \omega \cdot \left(0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r} + 0,05\right) \cdot 10^{-3} \cdot l \cdot U_{2F} \cdot \underbrace{\omega \cdot C_K \cdot l}_{\tilde{Y}_K} = \\ &= 0,5 \cdot \omega^2 \cdot \left(0,46 \cdot \log \frac{d_s}{r} + 0,05\right) \cdot 10^{-3} \cdot l^2 \cdot U_{2F} \cdot \underbrace{\frac{0,0242}{\log \frac{d_s}{r}} \cdot 10^{-6}}_{C_K} = \end{aligned}$$

Pokud zanedbáme člen 0,05, můžeme člen $\log \frac{d_s}{r}$ krátit. Dosadíme $\omega = 314 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ a za U_{2F} dosadíme jmenovité napětí sítě, tzn. $U_{2F} = U_F$

$$\begin{aligned} &= 0,5 \cdot \omega^2 \cdot 0,46 \cdot \cancel{\log \frac{d_s}{r}} \cdot 10^{-3} \cdot l^2 \cdot U_{2F} \cdot \frac{0,0242}{\cancel{\log \frac{d_s}{r}}} \cdot 10^{-6} = \\ &= 0,5 \cdot 314^2 \cdot 0,46 \cdot 10^{-3} \cdot l^2 \cdot U_F \cdot 0,0242 \cdot 10^{-6} = 0,55 \cdot U_F \cdot l^2 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

Obvykle nás zajímají hodnoty sdružené:

$$\Delta U_F = 0,55 \cdot U_F \cdot l^2 \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{\Delta U_S}{\sqrt{3}} = 0,55 \cdot \frac{U_S}{\sqrt{3}} \cdot l^2 \cdot 10^{-6}$$

$$\Delta U_S = 0,55 \cdot U_S \cdot l^2 \cdot 10^{-6} \quad [\text{kV}, \text{kV}, \text{km}]$$

Velikost přírůstku napětí ΔU_S závisí nejvíce na délce vedení l , a to kvadraticky.

Jaké bude napětí na konci vedení o jmenovitém napětí $U_S = 400 \text{ kV}$ a o délce 500 km při náhlém odlehčení sítě?

$$\Delta U_S = 0,55 \cdot U_S \cdot l^2 \cdot 10^{-6} = 0,55 \cdot 400 \cdot 500^2 \cdot 10^{-6} = 55 \text{ kV}$$

$$U_{2S} = U_{1S} + \Delta U_S = 400 + 55 = 455 \text{ kV}$$

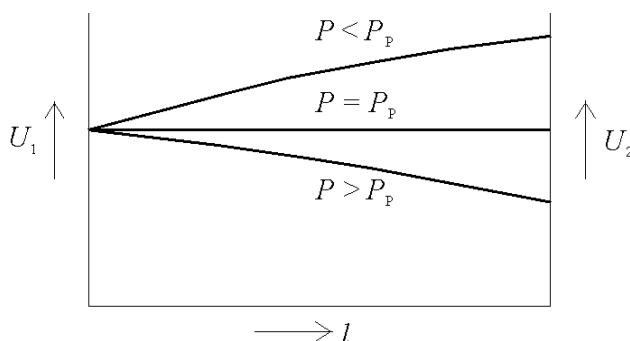
Vlnová impedance a přirozený výkon vedení

Vycházíme-li z Ferrantiho jevu a na konci vedení postupně zvyšujeme z nulové hodnoty odběr, nastane v určitém okamžiku stav, kdy se napětí na konci a na začátku vedení rovnají ($U_{1F} = U_{2F}$). V tomto okamžiku se vedením přenáší tzv. přirozený výkon vedení P_P a na konci vedení je připojena zátěž, jejíž impedance se rovná tzv. vlnové impedanci vedení Z_V .

Při přenosu přirozeného výkonu nastává na vedení nejpříznivější provozní stav. Při tomto přenosu jsou minimální ztráty, které jsou způsobeny pouze činným odporem, protože energie elektrostatického a magnetického pole jsou stejně velké. Jelikož působí proti sobě, vzájemně se vyruší. U ideálního vedení bez činného odporu by byla napětí na začátku a na konci vedení stejná.

Při přenosu výkonu P , který je menší, než přirozený výkon vedení P_P , je napětí na konci vedení vyšší, než na jeho začátku.

Při přenosu výkonu P , který je větší, než přirozený výkon vedení P_P , je napětí na konci vedení nižší, než na jeho začátku.



Při odvození vztahu pro vlnovou impedanci Z_V ideálního vedení vycházíme z rovnosti energií:

$$\frac{1}{2} \cdot C \cdot U_F^2 = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

$$\left(\frac{U_F}{I} \right)^2 = \frac{L}{C}$$

$$Z_V^2 = \frac{L}{C}$$

$$\boxed{Z_V = \sqrt{\frac{L}{C}}} \quad [\Omega, H, F]$$

Velikost vlnové impedance Z_V nezávisí na délce vedení, protože:

$$Z_V = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L_K \cdot l}{C_K \cdot l}} = \sqrt{\frac{L_K}{C_K}}$$

Velikost vlnové impedance Z_V závisí na konstrukci vedení, protože L_K i C_K závisí na d_S a r_e .

Vztah pro přirozený výkon:

$$P_p = 3 \cdot U_F \cdot I = 3 \cdot U_F \cdot \frac{U_F}{Z_V} = 3 \cdot \frac{U_F^2}{Z_V} = 3 \cdot \left(\frac{U_S}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \frac{1}{Z_V} = 3 \cdot \frac{U_S^2}{3 \cdot Z_V} = \frac{U_S^2}{Z_V}$$

$$\boxed{P_p = 3 \cdot \frac{U_F^2}{Z_V} = \frac{U_S^2}{Z_V}}$$

Velikost přirozeného výkonu závisí zejména na provozním napětí (na jeho kvadrátu).

Vlnová impedance Z_V bývá 270 až 400 Ω u venkovního a 35 až 40 Ω u kabelového vedení. Z předchozích hodnot Z_V plyne, že přirozený výkon kabelového vedení je přibližně desetkrát větší, než u vedení venkovního.

Orientační hodnoty přirozeného výkonu						
U_S [kV]		6	22	110	220	400
P_p vedení	kabelového [MW]	0,9	12	300	1200	–
	venkovního [MW]	0,09	1,2	30	120 – 160	400 – 580