

Dělení elektrických sítí

Elektrické sítě dělíme z několika hledisek :

A. Z hlediska parametrů :

- Sítě s prostorově soustředěnými parametry (sítě NN a VN) tzv. krátká vedení, u kterých respektujeme činný odpor \mathbf{R} u stejnosměrných sítí, u střídavých sítí respektujeme činný odpor \mathbf{R} a indukčnost vedení \mathbf{L} .
- Sítě s prostorově rozloženými parametry (sítě VVN) tzv. dlouhá vedení, u kterých respektujeme činný odpor \mathbf{R} , indukčnost \mathbf{L} a kapacitu \mathbf{C} ; u vedení se jmenovitým napětím 400 kV a výše ještě respektujeme svodovou vodivost \mathbf{G} .

B. Z hlediska hladiny napětí :

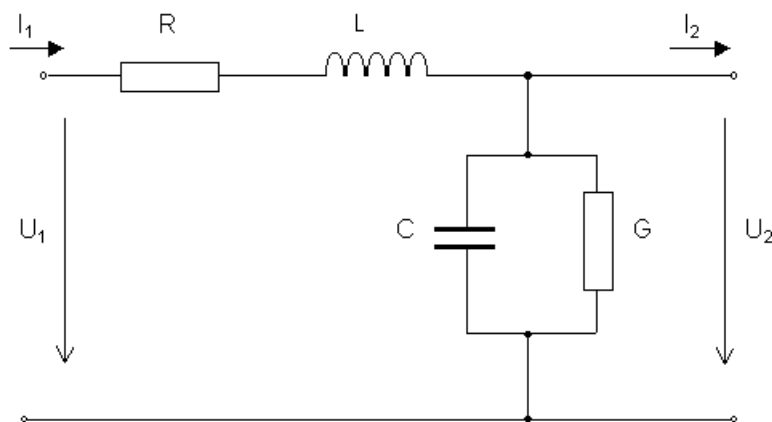
- přenosové sítě – 400 kV, 220 kV, částečně 110 kV,
- distribuční sítě – částečně 110 kV, 35 kV, 22 kV, 10 kV, 6 kV, 0.4 kV.

– Parametry vedení

V obecném případě mají vodiče čtyři parametry :

- činný odpor \mathbf{R} [Ω],
- indukčnost \mathbf{L} [H],
- kapacita \mathbf{C} [F],
- svod (svodová vodivost) \mathbf{G} [S].

Jednofázový model vedení s uvedením jednotlivých parametrů je na obr. 2.1.



Obr. 2. 1

Při výpočtech stejnosměrných vedení bude brán v úvahu pouze jeden parametr – činný odpor. Při výpočtech střídavých vedení NN a VN pak dva parametry – činný odpor a indukčnost vedení. *(Pozn. V některých případech (kabelová vedení NN) lze i u střídavých obvodů indukčnost zanedbat.)*

Při výpočtech střídavých vedení VVN a ZVN budou brány v úvahu všechny čtyři parametry vedení. *(Pozn. U vedení s menším jmenovitým napětím než 400 kV se zanedbává svodová vodivost.)*

Činný odpor **R** a indukčnost vedení **L** tvoří tzv. podélnou impedanci vedení, která je vyjádřena vztahem :

$$\bar{Z} = R + j\omega L \quad [\Omega] \quad (2.1)$$

Reálnou část podélné impedance tvoří činný odpor, imaginární část tvoří induktivní reaktance ($X = \omega L$).

Kapacita vedení **C** a svodová vodivost **G** tvoří tzv. příčnou admitanci vedení, která je vyjádřena vztahem :

$$\bar{Y} = G + j\omega C \quad [S] \quad (2.2)$$

$\omega = 2 \pi f$... kruhová frekvence [s^{-1}]
 f ... frekvence [Hz]

– Činný odpor vedení

Činný odpor vedení je závislý na vodivém materiálu vedení. Odpor vedení je přímo úměrný měrnému odporu vedení, délce vedení a nepřímo úměrný průřezu vedení.

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.3)$$

R ... odpor vedení [Ω]
 ρ ... měrný odpor vodiče [$\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}$]
l ... délka vodiče [m]
S ... průřez vodiče [mm^2]

Činný odpor se udává při určité teplotě (20°C), je totiž teplotně závislý. Pro vodiče platí, že odpor s rostoucí teplotou roste a naopak. Tuto závislost zohledňuje teplotní součinitel odporu α . Pro odpor při libovolné teplotě platí vztah :

$$R_{\vartheta} = R_{20} \cdot (1 + \alpha \Delta \vartheta) \quad (2.4)$$

R_{ϑ} ... činný odpor při teplotě ϑ [Ω]
 R_{20} ... činný odpor při teplotě 20°C [Ω]
 α ... teplotní součinitel odporu [K^{-1}]
 $\Delta \vartheta$... teplotní rozdíl od 20°C [K]

Činný odpor je také frekvenčně závislý (skinefekt), lze tedy říci, že střídavý odpor je vyšší než odpor stejnosměrný.

$$R_{\text{STR}} = k \cdot R_{\text{SS}} \quad (2.5)$$

Pro průmyslové kmitočty je ovšem zvýšení odporu nepatrné ($k = 1$) a není s ním obvykle uvažováno.

Protože se v elektrických sítích používají jako vodiče především lana (nikoli dráty), je použití základního vztahu pro činný odpor (2.3) problematické.

Proto je výrobcem vodiče stanovena hodnota činného odporu vtažená na jednotku délky (obvykle kilometr) R_K . Pro výsledný odpor lana pak platí jednoduchý vztah :

$$R = R_K \cdot l \quad [\Omega; \Omega \cdot \text{km}^{-1}; \text{km}] \quad (2.6)$$

Ohmický odpor země

Protože v mnoha případech je zem používána jako vodič elektrické energie, je nutno vyjádřit také činný odpor země.

$$R_Z = \pi^2 f \cdot 10^{-4} \quad [\text{Hz}; \Omega \cdot \text{km}^{-1}] \quad (2.7)$$

Pro síťový kmitočet 50 Hz je tedy odpor země přibližně $0,05 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$. V této hodnotě není zahrnut přechodový odpor zemničů.

– Indukčnost vedení

Kolem vodiče se vytváří elektromagnetické pole, které působí na okolní vodiče i na vodič samotný. Proto vykazuje každé elektrické vedení také indukčnost. Odvození indukčnosti vedení vychází ze znalostí řešení elektromagnetického pole.

Rozlišujeme vlastní indukčnost vodiče a vzájemnou indukčnost mezi jednotlivými vodiči. Pro vlastní indukčnost vodiče lze odvodit následující vztah, který udává indukčnost vztaženou na jednotku délky vodiče (zpravidla na kilometr).

$$L = 0,46 \log \frac{2l}{r} - 0,15 \quad [\text{mH.km}^{-1}] \quad (2. 8)$$

r, l jsou rozměry vodiče (poloměr, délka) a dosazují se ve stejných jednotkách.

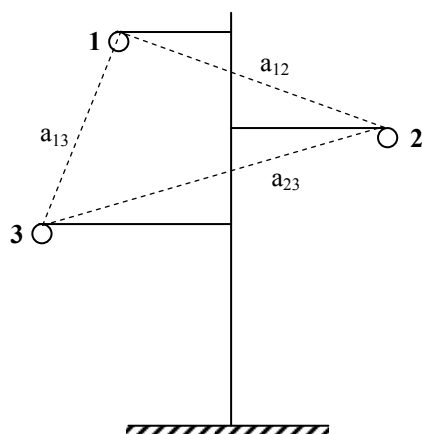
Pro vzájemnou indukčnost na kilometr platí následující vztah :

$$M = 0,46 \log \frac{2l}{a} - 0,2 \quad [\text{mH.km}^{-1}] \quad (2. 9)$$

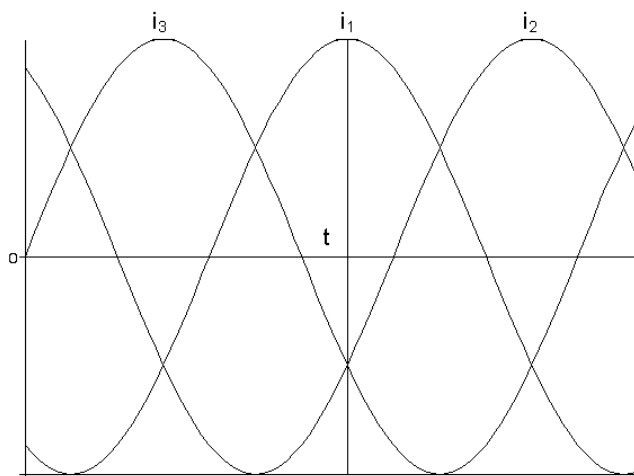
a ... vzdálenost mezi vodiči

Oba uvedené vztahy již v sobě zahrnují hodnotu permeability. Pomocí vztahů 2.8 a 2.9 lze již odvodit výslednou indukčnost daného vedení.

Jednoduché trojfázové vedení nesymetrické



Zde opět platí, že součet proudů v každém okamžiku je roven nule. Vzájemné indukčnosti mezi jednotlivými vodiči ale nejsou stejné. Pro odvození bude vybrán okamžik t v průběhu trojfázového proudu, kdy proud jedné fáze je maximální



Obr. 2. 2

Pro vztah mezi proudy jednotlivých fází je tedy možno napsat :

$$-i_1 = i_2 + i_3 ; \quad i_2 = i_3 = -\frac{i_1}{2} \quad (2. 16)$$

Pro elektromotorické napětí vodiče 1 pak platí :

$$e = -L \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} M_{12} \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{2} M_{13} \frac{di_1}{dt} = -\left(L - \frac{1}{2} M_{12} - \frac{1}{2} M_{13}\right) \frac{di_1}{dt} = -L_{C1} \frac{di_1}{dt} \quad (2. 17)$$

Pro výslednou indukčnost vodiče 1 pak platí :

$$L_{C1} = L - \frac{1}{2} M_{12} - \frac{1}{2} M_{13} = 0,46 \log \frac{\sqrt{a_{12} \cdot a_{13}}}{r} + 0,05 \quad [\text{mH.km}^{-1}] \quad (2. 18)$$

a_{xy} ... vzdálenosti mezi příslušnými fázemi

Analogicky lze odvodit vztahy pro celkovou indukčnost vodiče 2 a 3 :

$$L_{C2} = 0,46 \log \frac{\sqrt{a_{12} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05 \quad [\text{mH.km}^{-1}] \quad (2. 19)$$

$$L_{C3} = 0,46 \log \frac{\sqrt{a_{13} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05 \quad [\text{mH.km}^{-1}] \quad (2. 20)$$

Z uvedených vztahů vyplývá, že každý vodič nesymetrického trojfázového vedení má jinou hodnotu indukčnosti. Většinou se počítá tzv. střední indukčnost vedení, která je vyjádřena aritmetickým průměrem indukčností jednotlivých vodičů :

$$L_{Cstř} = \frac{1}{3} (L_{C1} + L_{C2} + L_{C3}) = 0,46 \log \frac{\sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}}}{r} + 0,05 \quad [\text{mH.km}^{-1}] \quad (2. 21)$$

V praxi se nejčastěji používá vztah :

$$L_{Cstř} = 0,46 \log \frac{a_s}{r} + 0,05 \quad [\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}] \quad (2. 22)$$

$L_{Cstř}$... indukčnost vedení na jeden kilometr $[\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}]$
 a_s ... střední vzdálenost vodičů $[\text{m}]$
 r ... poloměr vodiče $[\text{m}]$

$$a_s = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}} \quad [\text{m}] \quad (2. 23)$$

(a_{12} , a_{13} , a_{23} ... vzdálenosti jednotlivých fází)

Uvedené vztahy platí pro trojfázové venkovní vedení, pro jiné druhy venkovních vedení je rozlišné vyjádření střední vzdálenosti vodičů.

Poloměr vodiče r , který se vyskytuje v předchozích vztazích je možno u kruhových drátů vypočítat z průřezu, u lan je nutno tuto hodnotu vyhledat v tabulkách.

Zákrut (transpozice) vedení

Aby vlivem rozdílných indukčností vodičů nedošlo k nesymetrii napětí na konci vedení, provádí se na vedeních VVN a ZVN tzv. zákrut. V místě zákrutu se provede vystřídání pozice vodičů v hlavě stožáru. Zákrutem se dosáhne toho, že indukčnost každé fáze je přibližně stejná.

Indukčnost svazkových vodičů

U vedení VVN a ZVN se zpravidla používá tzv. svazkových vodičů. Znamená to, že každá fáze není tvořena pouze jedním vodičem, ale svazkem několika vodičů, které mají od sebe vzdálenost d . Počet vodičů ve svazku n je různý (v našich sítích se nejčastěji vyskytuje dvojsvazek, trojsvazek, popř. čtyřsvazek).

Výhody použití svazkových vodičů jsou následující :

- zlepšení mechanických vlastností vedení,
- vliv na parametry vedení (menší indukčnost a tím i induktivní reaktance),
- zmenšení ztrát korunou.

Z hlediska elektromagnetického pole se chová svazkový vodič v podstatě jako kruhový vodič o tzv. ekvivalentním poloměru r_e . Pro tento poloměr platí následující vztah :

$$r_e = \sqrt[n]{r \cdot d_{12} \cdot d_{13} \cdot \dots \cdot d_{1n}} \quad (2. 24)$$

Výsledný vztah pro střední indukčnost vedení se svazkovými vodiči je dána vztahem :

$$L_{\text{fstř}} = 0,46 \log \frac{\sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}}}{\sqrt[n]{r \cdot d_{12} \cdot d_{13} \cdot \dots \cdot d_{1n}}} + \frac{0,05}{n} = 0,46 \log \frac{a_s}{r_e} + \frac{0,05}{n} \quad [\text{mH.km}^{-1}]$$

(2. 25)

Z tohoto vztahu je patrné, že vedení se svazkovými vodiči má nižší indukčnost a tím i nižší induktivní reaktanci.

Indukčnost kabelů

U kabelu je indukčnost nižší než u venkovního vedení o stejných přenosových schopnostech. Vztah 2.22 je možno použít pouze pro trojfázové plastové kabely. U kabelů se stíněním, pancířem atd. platí vztahy složitější. Induktivní reaktanci kabelů na kilometr délky udává výrobce.

Pozn. jak vyplývá ze vztahů pro indukčnost v této kapitole, je indukčnost vedení závislá hlavně na vzdálenosti vodičů, které jsou závislé na napěťové hladině. Podle napěťové hladiny vedení a uspořádání (jednoduché nebo dvojité vedení) je možno tedy přibližně určit indukčnost (induktivní reaktanci) vedení.

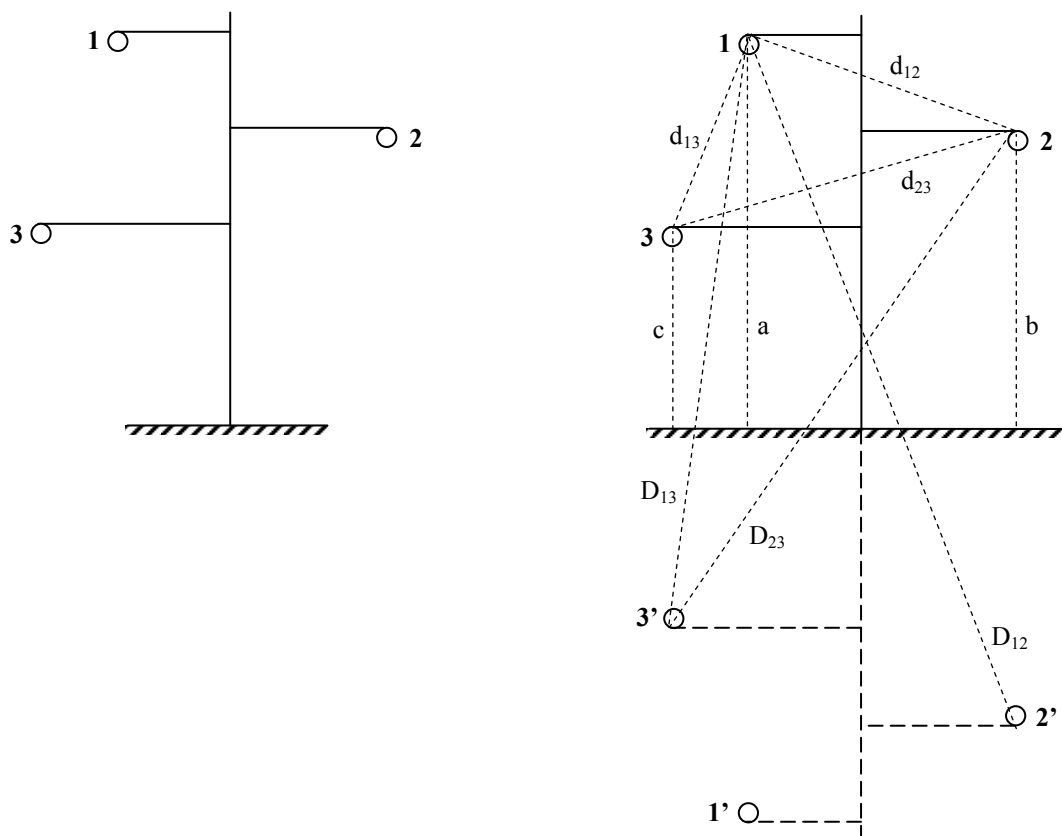
Kapacita vedení

Kolem vodiče se vytváří elektrické pole, které působí na okolní vodiče i na vodič samotný. Proto vykazuje každé elektrické vedení také kapacitu. Odvození kapacity vedení vychází ze znalostí řešení elektrostatického pole.

Základním vztahem, ze kterého se vychází při odvození kapacity vedení, je vztah pro elektrický potenciál.

$$U = \frac{Q}{2\pi \varepsilon} \ln \frac{\rho_0}{\rho} \quad [V; C.m^{-1}; F.m^{-1}] \quad (2. 26)$$

U	... potenciál [V]
Q	... náboj vodiče [C.m ⁻¹]
ε	... permitivita [F.m ⁻¹]
ρ	... vzdálenost od vodiče [m]
ρ ₀	... vzdálenost od vodiče, ve které se předpokládá nulový potenciál [m]



Trojfázové vedení

Předpokládáme nesymetrické vedení, jednotlivé vodiče mají od sebe vzdálenost d_{xy} . Obdobně jako u odvození indukčnosti trojfázového vedení je uvažován časový okamžik, kdy ve vodiči **1** je proud maximální (amplituda). Pak pro elektrické náboje platí :

$$Q = Q_1 ; Q_2 = Q_3 = -\frac{Q}{2} \quad (2.35)$$

Pro elektrický potenciál na povrchu vodiče **1** platí vztah :

$$U_1 = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{r} - \frac{Q}{4\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{d_{12}} - \frac{Q}{4\pi\epsilon} \ln \frac{\rho_0}{d_{13}} = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{\sqrt{d_{12}d_{13}}}{r} \quad (2.36)$$

Pro kapacitu vodiče **1** pak platí :

$$C_1 = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt{d_{12} d_{13}}}{r}} \quad [\mu\text{F.km}^{-1}] \quad (2. 37)$$

Analogicky pro kapacitu dalších dvou vodičů platí :

$$C_2 = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt{d_{12} d_{23}}}{r}} \quad [\mu\text{F.km}^{-1}] \quad (2. 38)$$

$$C_3 = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt{d_{13} d_{23}}}{r}} \quad [\mu\text{F.km}^{-1}] \quad (2. 39)$$

Obdobně jako u indukčnosti má každý vodič jinou kapacitu. U vedení se většinou uvádí střední kapacita vedení, která je dána aritmetickým průměrem kapacit jednotlivých vodičů.

$$C_{\text{stř}} = \frac{1}{3} (C_1 + C_2 + C_3) = \frac{1}{18 \ln \frac{\sqrt[3]{d_{12} d_{13} d_{23}}}{r}} = \frac{1}{18 \ln \frac{d_s}{r}} \quad [\mu\text{F.km}^{-1}] \quad (2. 40)$$

$$d_s = \sqrt[3]{d_{12} d_{13} d_{23}} \quad (2. 41)$$

d_s ... střední vzdálenost vodičů

Trojfázové vedení s uvažováním vlivu země

U tohoto případu je ještě nutno zadat výšku vodičů nad zemí (a, b, c) a vzdálenost vodičů od zrcadlových obrazů (D_{xy}).

Střední kapacita vodiče je dána aritmetickým průměrem kapacit jednotlivých vodičů.

$$C_{\text{stř}} = \frac{1}{3} (C_1 + C_2 + C_3) = \frac{1}{18 \ln \frac{d_s}{r D_s}} = \frac{0,0242}{\log \frac{d_s}{r D_s}} \quad [\mu\text{F.km}^{-1}] \quad (2. 45)$$

$$d_s = \sqrt[3]{d_{12} d_{13} d_{23}} \quad (2. 46)$$

$$D_s = \sqrt[3]{D_{12} D_{13} D_{23}} \quad (2. 47)$$

$$m = \sqrt[3]{a b c} \quad (2. 48)$$

Kapacita vedení se svazkovými vodiči

Pro kapacitu vedení se svazkovými vodiči platí stejné vztahy, které byly uvedeny s tím rozdílem, že místo poloměru vodiče r se dosazuje hodnota ekvivalentního poloměru svazku r_e .

Kapacita kabelů

Obecně lze konstatovat, že kapacita kabelů je větší než kapacita venkovního vedení stejné napěťové hladiny a stejných přenosových schopností. Vyplývá to z dříve uvedených vztahů. Také relativní permitivita izolace kabelů má vyšší hodnotu než jedna. Vzorce pro výpočet kapacity kabelů jsou složitější než u venkovního vedení a jsou závislé na typu kabelu (pokovené žíly, pancíř atd.).

Pokud kapacitu kabelů neudává výrobce, je vhodné ji určit měřením.

Měření kapacity

Kapacita se určuje z měření tzv. nabíjecího proudu. Nabíjecí proud I_{NAB} je proud, který teče do vedení (kabelu) při stavu naprázdno. Kapacita je dána vztahem :

$$C = \frac{I_{\text{NAB}}}{2\pi f l U_f 10^{-6}} \quad [\mu\text{F.km}^{-1}; \text{A}; \text{km}; \text{V}] \quad (2. 49)$$

I_{NAB} ... nabíjecí proud [A]
 f ... kmitočet sítě [Hz]
 l ... délka vedení [km]
 U_f ... fázové napětí vedení [V]

Hodnota měřené kapacity je vždy větší než hodnoty vypočtené kapacity. Uvedené výpočtové vztahy respektují pouze vliv vodičů a země. Ve výpočtových vztazích není respektován vliv stožárů, armatur atd.

– Svodová vodivost

Svod (svodová vodivost) je způsobena vodivostí izolátorů. Svod tedy závisí na kvalitě izolátorů, ale také na provozních a atmosférických podmínkách. Svod způsobuje činné ztráty na vedení. Svod se také obvykle vyjadřuje v hodnotách svodových ztrát na kilometr vedení.

$$\Delta P_s = 3 U_f^2 G_s = U_s^2 G_s \quad [\text{W.km}^{-1}; \text{V}; \text{S.km}^{-1}] \quad (2. 50)$$

ΔP_s ... svodové ztráty [W.km^{-1}]
 U_f ... fázové napětí [V]
 U_s ... sdružené napětí [V]
 G_s ... svodová vodivost [S.km^{-1}]