

**STREDNÁ PRIEMYSELNÁ ŠKOLA ELEKTROTECHNICKÁ
S. A. JEDLIKA V NOVÝCH ZÁMKOCH**

**ŠTUDIJNÝ ODBOR:
ELEKTROTECHNIKA;**

KONTROLA VEDENIA VVN

PROJEKT Z ELEKTROENERGETIKY

Školský rok: 2005 / 2006 Trieda, skupina: 3.AZ Číslo protokolu: - 1 -	Meno: Igor Cagáň Dátum začatia: 26.01.2006 Dátum odovzdania: 03.05.2006
--	--

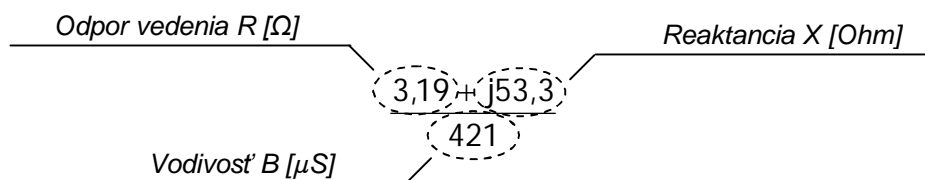
OBSAH:

- 1. Zadanie**
- 2. Teoretická príprava**
- 3. Výpočty vedení**
- 4. Záver**

Práca obsahuje poč.:	LISTOV TABULIEK OBRÁZKOV	- 15 - - 00 - - 14 -	Klasifikácia:
-----------------------------	---	-------------------------------------	----------------------

1. Zadanie

Skontrolujte pomery na vedení **Rimavská Sobota – Šaca**, ktorého parametre udáva Štúdia rozvoja energetiky nasledovne:

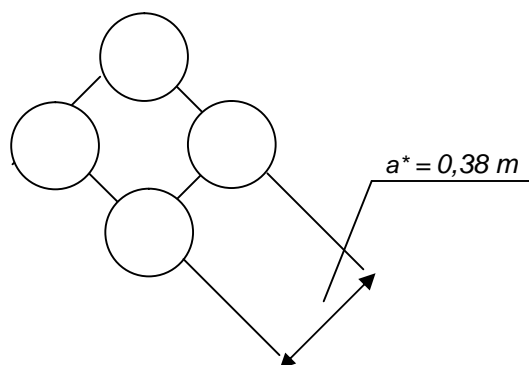
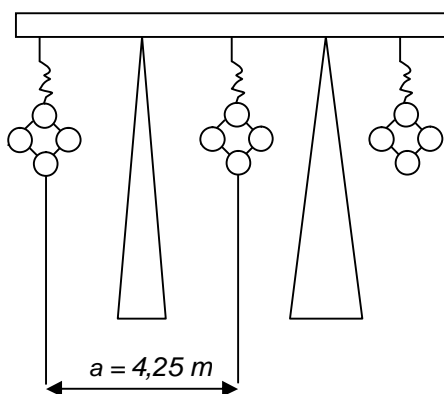


napätie na konci vedenia
činný výkon na konci vedenia
fázový posun na konci vedenia
dĺžka vedenia
vodiče
vzdialenosť vodičov vo štvorzväzku
vzdialenosť vodičov na stožiaroch

$U_2 = 400 \text{ kV}$
 $P_2 = 432 \text{ MW}$
 $\cos \varphi_2 = 0,832$
 $l = 110 \text{ km}$
 $3 \times 350 \text{ AlFe6}$
 $a^* = 0,38 \text{ m}$
 $a = 4,25 \text{ m}$

OBR1: umiestnenie vodičov na stožiaroch

OBR2: umiestnenie vodičov vo štvorzväzku



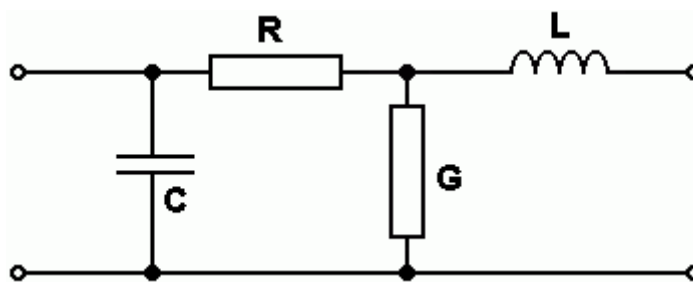
2. Teoretická príprava

V tomto projekte budeme skúmať „pohodlie elektriny“ na jej dlhej ceste elektrickým vedením vysokého napätia až do našej elektrickej rúry. Zistíme, ktoré parametre vedenia nám pri dlhých prenosoch prinášajú úžitok, a ktoré, naopak spôsobujú projektantom VVN vrásky na čele...

Najskôr si však všetky tieto parametre zhrňme; Každý vodič na svete má svoj odpor (**R**), teda aj pri vedení VVN môžeme predpokladať, že tento odpor bude spôsobovať prenosové straty prúdu. Na dlhých vedeniach, ktorými tečie prúd sa indukuje mg. pole a táto indukcia spôsobuje ďalšie straty. Vedenie sa teda tiež správa ako cievka (**L**). O oboch parametroch môžeme spoločne hovoriť ako o impedancii vedenia. Keď si predstavíme vedenie, rozloženie jeho vodičov, môže sa nám javiť tiež ako kondenzátor – a to hneď dvojaký: vodič vedenia – vzduch – vodič vedenia, predstavuje typický model kondenzátora (**C**). Ďalej môže prísť i k nežiadúcemu či neplánovanému prechodu prúdu priestorom medzi znečistenými izolátormi alebo cez vlhký vzduch – zvod (**G**), konkrétne tzv. koróna. Avšak keď uvážime, v ako malej miere k zvodu bežne prichádza, môžeme zvod pri našich úvahách o vedení aj zanedbať.

Na základe predošlých úvah už poľahky zostavíme i náhradnú schému VVN, pre elektrikárov tak nevyhnutnú pre ďalšie štúdie o tomto vedení:

OBR3: Zbežný náčrt náhradnej schémy vedenia VVN



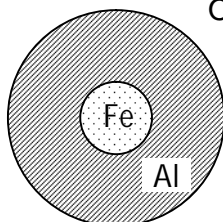
2.1 ODPOR VEDENIA

Slovným spojením *odpor vedenia* máme na mysli celkový činný odpor celého vedenia zväzkových vodičov na plnej dĺžke vedenia vysokého napätia (v našom prípade na úseku Rimavská Sobota – Šaca), ktorý spôsobuje straty vo forme unikajúceho tepla.

Predtým ako započneme akýkoľvek výpočet odporu je potrebné, aby sme vedeli o akom vodiči budeme uvažovať, pretože parametre odporu závisia bytostne od parametrov vodiča. Na našom kontrolovanom úseku sú podľa *Štúdie energetiky* použité vodiče:

3 x 350 AIFe6

Z tohto zadania možno vyčítať, že na nami kontrolovanom úseku sú použité tri vodiče typu 350AIFe6. Aby sme vedeli ďalej rozvíjať naše úvahy, musíme vedieť, že špeciálne vodiče AIFe sa skladajú z dvoch častí: z vodivostnej časti (Al) a z pevnostnej časti (Fe) ako možno vidieť i na obrázku:



Označenie 350AIFe6 nám hovorí aký (menovitý) prierez má vodivostná zložka vodiča (Al): 350 mm². Podľa toho v akom pomere je vo vodiči zastúpená vodivostná a pevnostná zložka, je v typovom označení vodiča pridelené pomerné číslo: 350AIFe6. Potom možno vypočítať matematický (celkový) prierez lana nasledovne:

OBR4: Štruktúrne zloženie vodičov AIFe

$$v2.1.1 \quad \frac{S_{Al}}{S_{Fe}} = \frac{6}{1} \Rightarrow S_{Fe} = \frac{S_{Al}}{6} = \frac{350}{6} = 58,33 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$v2.1.2 \quad S = S_{Fe} + S_{Al} = 350 + 58,33 = 408,33 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Po týchto úvahách o vodiči možno pristúpiť k počítaniu odporu samotného vodiča:

v2.1.3

$$R = R_k \cdot l \cdot \frac{1}{n} = 0,085 \cdot 110 \cdot \frac{1}{3} = 3,12 \text{ [}\Omega\text{]} ,$$

kde : **R_k** [Ω.km⁻¹] – maximálny odpor lana 350AIFe6 na jednom kilometri (údaj získaný z učebnice *Príklady a úlohy z elektroenergetiky: Homolka, F. Alfa 1978, Bratislava, s. 78, tab. 35*)
l [km] – dĺžka celého vedenia (údaj z práce *Štúdia rozvoja energetiky*)
n [/] – počet vodičov vo zväzku

* Prevrátená hodnota počtu vodičov n vo vzorci nám hovorí, že čím väčší počet vodičov by sme vo zväzkovom vedení mali, tým väčší by odpor klesol, ako to môžeme vidieť aj nižšie:

v2.1.4

$$1/6 = 0,1666 < 1/3 = 0,33$$

Hodnota odporu vedenia, ktorú uvádza už spomínaná štúdia (3,19) sa od mnou vypočítanej hodnoty (3,12) líši o 0,07 ohmu (3,19-3,12). Rozdiel je zanedbateľný, prakticky ide o odchýlku 2%. Mój výpočet a úvahu preto považujem za správne.

2.2 INDUKČNÁ REAKTANCIA VEDENIA

Indukčná reaktancia vedenia X sa podieľa na najväčších stratách počas prenosu elektriny vedením vďaka tomu, že indukčnosť L , od ktorej priamoúmerne reaktancia závisí spôsobuje akumuláciu prenášanej energie (zameškanie fázoru prúdu za fázorom napätia) a jej následnú premenu na neželaný magnetický tok, ktorý sa šíri do okolia.

Pretože je už z vyššie uvedených dôvodov indukčná reaktancia nevýhodná pri prenose energie vedením VVN, je vhodné vedieť, čo ju ovplyvňuje, a teda ako sa pred ňou chrániť. Pouvažujme od ktorých parametrov vedenia závisí indukčná reaktancia. Vychádzajme zo vzorca pre výpočet indukčnej reaktancie na celom vedení:

v2.2.1

$$X_L = \omega \cdot L_k \cdot l = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_k \cdot l,$$

kde: ω – uhlová rýchlosť = $2 \cdot \pi \cdot f$
 L_k – indukčnosť vodiča na jednom kilometri

v2.2.2

Minimálna indukčnosť L_{MIN}

Permeabilita vzduchu μ_0

$$L_k = 0,05 + 0,46 \cdot \log \frac{a}{r_e} \cdot 10^{-3},$$

kde: r – ekvivalentný polomer (vzorec z učebnice, s. 81), podľa počtu vodičov vo zväzku:

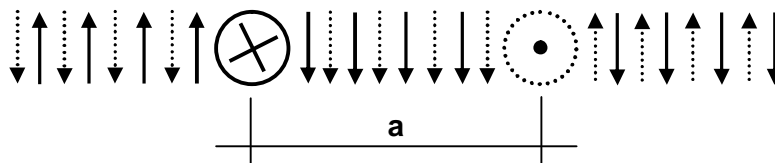
v2.2.3

$$r_e = \frac{1,58}{2} \cdot \sqrt[3]{a^2 \cdot d},$$

kde: d – skutočný priemer vodiča (učebnica, s. 78, tab. 35)

Zo vzorca v2.2.2 vidíme, že indukčnosť na jednom kilometri L_k závisí od vzdialenosti vodičov na stožiaroch a . Túto zákonitosť lepšie pochopíme z nasledovného obrázku:

OBR5:
Magnetické
polia v okolí
dvoch vodičov



Obrázok s dvoma vodičmi, ktoré sú od seba vzdialené na a metrov a s rôznym smerom prúdu, ktorý nimi tečie, ukazuje, že podľa pravidla pravej ruky sa v okolí vodičov indukuje magnetické pole s určitou orientáciou (podľa vzorca:)

v2.2.4

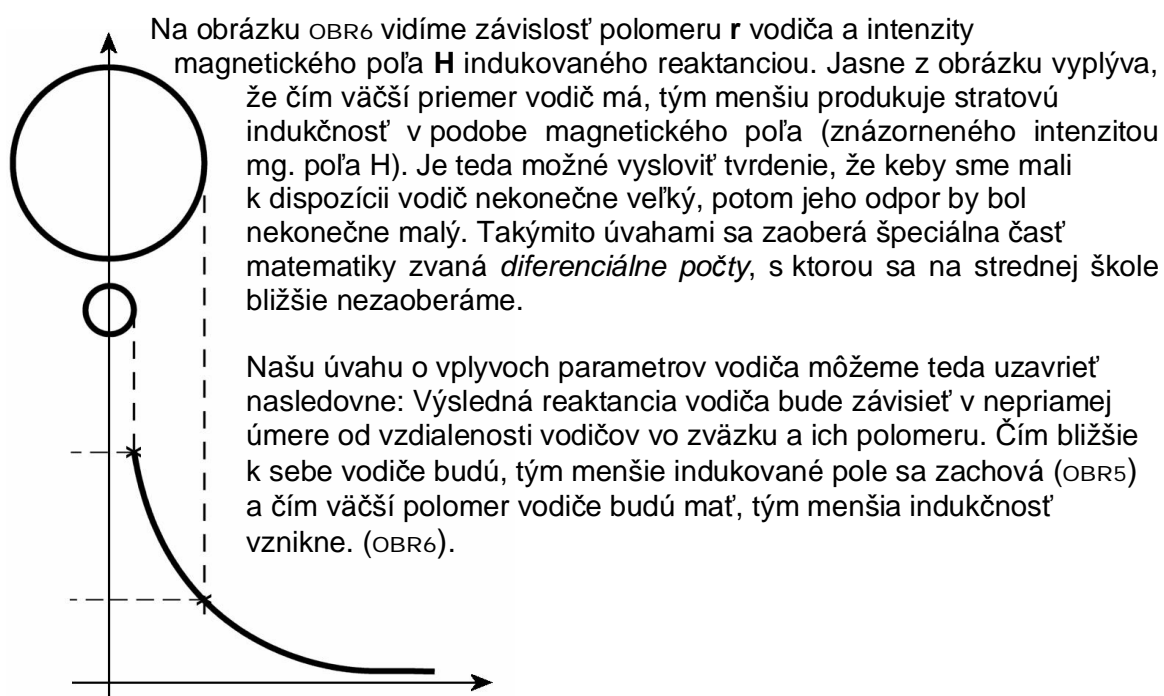
$$L = \frac{\Phi}{I}$$

Ďalej zisťujeme, že magnetické pole sa udrží iba medzi vodičmi, pretože tam má rovnakú (zhodnú) orientáciu. Po bokoch vodičov sa rôzne orientované magnetické polia navzájom vrušia. Indukčnosť teda uvažujeme iba tú, medzi vodičmi – a tá rastie priamoúmerne so vzdialenosťou vodičov. Preto prvým riešením ako zmenšiť indukčnosť vedenia je znížiť vzdialenosť vodičov od seba na vedení čo najviac. Pri vzdušných vedeniach tu však existujú isté bezpečnostné limity, pretože veľmi blízkym zavesením lán by mohlo dôjsť k ich rozkolísaniu vetrom a k ich prípadnému narážaniu do seba.

Podobný jav, aký sme opísali vyššie využíva tzv. bifilárne vedenie, ktoré sa skladá z dvoch tesne vedľa seba uložených žíl toho istého vodiča – teda prúd do vodiča vtekajúci (zároveň aj ním indukované mg. pole) sa rovná prúdu z vodiča vytekajúceho (zároveň aj ním indukovanému mg. poľu), no a podľa I. Kirkhoffovho zákona je potom výsledný prúd nulový (zároveň sa neindukuje žiadne mg. pole), pretože sa účinky prúdov navzájom vrušia.

Skúmajme však vlastnosti parametrov vodiča na jeho indukčnosť ďalej, uvažujme napríklad o hrúbke vodiča:

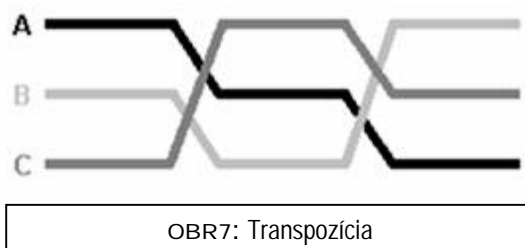
Pri vzorci v2.2.2 sme sa zmienili o akomsi ekvivalentnom polomere r_e , ktorý rátame podľa počtu vodičov vo zväzku. Položme si preto otázku, prečo sa používajú tzv. zväzkové vodiče (o ich konštrukcii sme sa zmienili pri OBR4) miesto klasických? Alebo prečo miesto hrubého lana použijeme viacero tenších lán?



OBR6: Vplyv r vodiča na vznik stratového mg. poľa

Keď budeme v obrázku OBR5 uvažovať o troch vodičoch vedľa seba, dospejeme k záveru, že vo všetkých vodičoch bude razom indukcia rôzna. To by spôsobovalo asymetriu časových priebehov prúdov vodičom, a teda aj nesymetrické zaťaženie vedenia. Aby sme zaistili rovnakú indukciu vo všetkých vodičoch, použijeme

transpozíciu (OBR7). Transpozícia je krútenie vodičov, teda cyklické striedanie ich vzájomnej polohy tak, aby sa každý vodič vo svojej pozícii vystriedal. Tým sa eliminuje asymetria a vedenie je zaťažované symetricky.



Pri použití **transpozície** sa menia vzdialenosti vodičov na stožiaroch voči sebe, teda ekvivalentná vzdialenosť medzi vodičmi na stožiaroch sa vypočíta podľa vzorca:

v2.2.5

$$a = \sqrt[3]{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3} ,$$

kde: $a_1 = |a_1 a_2| = 4,25\text{m}$
 $a_2 = |a_1 a_3| = 8,50\text{m}$
 $a_3 = |a_2 a_3| = 4,25\text{m}$

Pretože násobíme tri dĺžkové miery, musíme ich aj odmocniť príslušnou odmocninou. Inak by sme dostali kubický rozmer.

Ak všetky predošlé úvahy zhmieme do jedného výsledného vzorca, ten bude vyzeráť nasledovne:

v2.2.6

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_k \cdot l$$

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left(0,05 + 0,46 \cdot \log \frac{\sqrt[3]{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3}}{1,58 \cdot \sqrt[3]{a^2 \cdot d}} \right) \cdot 10^{-3} \cdot l$$

$$X_L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot \left(0,05 + 0,46 \cdot \log \frac{5,35}{1,58 \cdot \sqrt[3]{0,38^2 \cdot 0,0265}} \right) \cdot 10^{-3} \cdot 110$$

$$X_L = 27,74 \text{ } [\Omega]$$

Hodnota reaktancie vedenia, ktorú uvádza štúdia (53,3) sa od mnou vypočítanej hodnoty líši (214,26) o 160,96 ohmu (214,26-53,3). Odchýlka je príliš veľká, a teda v mojej úvahe mohol byť chybný môj nesprávny odhad vzájomnej vzdialenosti lán na stožiaroch.

2.3 IMPEDANCIA VEDENIA

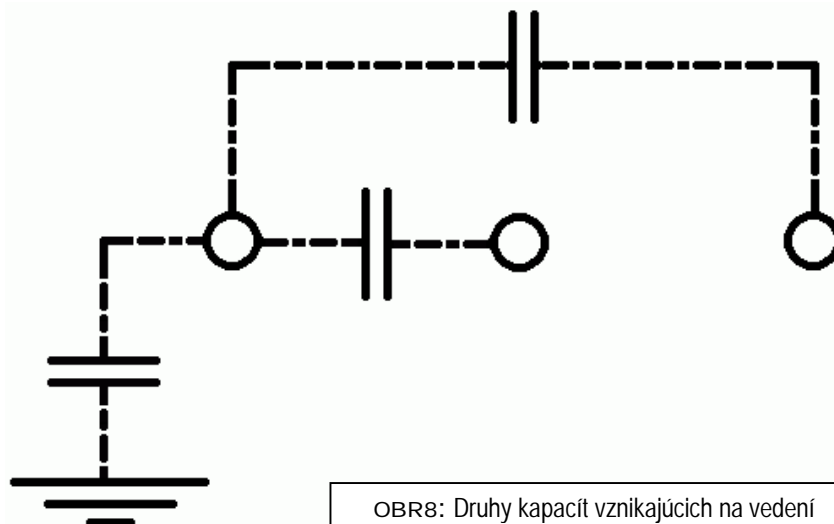
Impedancia vedenia sa skladá z dvoch zložiek, a to z činného odporu vedenia vypočítateľného podľa vzorca v2.1.3 a z reaktancie vedenia, vypočítanej podľa vzorca v2.2.6:

v2.3.1

$$\bar{Z} = R + jX_L = 3,12 + j27,74$$

Ak rozvinieme naše počiatočné úvahy o kapacite vedenia na samom začiatku projektu, dopracujeme sa postupne k trom druhom kapacitných efektov, ktoré na vedení vznikajú:

- A) Kapacita medzi dvoma susednými zväzkovými vodičmi; kondenzátorový efekt vzniká nasledovne: vodič – vzduch – vodič.
- B) Kapacita medzi prvým a posledným vodičom vedenia; kondenzátorový efekt vzniká nasledovne: vodič – vzduch – vodič.
- C) Kapacita medzi vedením (jednotlivými vodičmi) a zemou; kondenzátorový efekt vzniká nasledovne: vodič – vzduch – zem = ide o tzv. zvod.



Z teórie druhého ročníka vieme, že pri kapacítore (kondenzátore) napätie mešká za prúdom počas cyklu nabíjania. Po nabití je však prúd kondenzátorom dodávaný do obvodu. Teda podľa predbežných úvah, by kapacita vedenia mala byť skôr užitočná ako parazitná a mala by v určitej miere kompenzovať reaktančné straty spôsobované indukčnosťou.

Keďže uvažujeme o kapacite, budeme vychádzať zo vzorca pre výpočet kapacity klasického kondenzátora:

v2.4.1

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d},$$

kde : ϵ [$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$] – permitivita, vlastnosť prostredia
 S [km^2] – prierez vodiča
 d [m] – vzdialenosť dvoch dosiek kondenzátora od seba

Na základe tohto vzorca bol energetikmi odvodený špeciálny vzorec na výpočet kapacity vedenia, v ktorom sú zohľadnené vplyvy susedných vodičov na vedení a vplyv zeme – teda tie vplyvy, ktoré vytvárajú samotný efekt kapacity vedenia:

v2.4.2

$$C_k = \frac{0,0242}{\log \frac{a}{r}}$$

Kapacita vedenia však nie je porovnateľný parameter s indukčnou reaktanciou vedenia. Aby sme dostali kapacitnú reaktanciu (kapacitnú vodivosť) vedenia, musíme uvažovať nasledovne:

Kapacita pre vedenie predstavuje istú záťaž. Záťaž si v tomto prípade predstavme ako odpor a ten už potom vieme do Ohmovho zákona ľahko dosadiť. Kapacitnú vodivosť si potom predstavme ako akýsi prúd. Z úvah dostaneme nasledovný vzťah:

v2.4.3

$$B = \frac{U}{X} = \frac{U}{\frac{1}{\omega \cdot C}} = U \cdot \omega \cdot C$$

Keď tento vzťah ďalej rozvedieme a dosadíme doň hodnoty, vypočítame parameter kapacitnej vodivosti vedenia:

v2.4.4

$$B = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{0,0242}{\log \frac{\sqrt[3]{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3}}{\frac{1,58}{2} \cdot \sqrt[3]{a^{*2} \cdot d}}} \cdot 110$$

$$B = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \frac{0,0242}{\log \frac{\sqrt[3]{4,25 \cdot 8,5 \cdot 4,25}}{\frac{1,58}{2} \cdot \sqrt[3]{0,38^2 \cdot 0,0265}}} \cdot 110$$

$$B = 511 \mu S$$

Ako vidíme, nami vypočítaná hodnota (511) sa od zadanej (421) líši o hodnotu 90 mikrosímensov (511-421=90). Naša odchýlka môže byť spôsobená nesprávnou úvahou o vzdialenosti vodičov od seba, teda zlou úvahou o vzájomnej vzdialenosti vodičov vo zväzku a^* , prípadne o ich vzájomnej vzdialenosti na vedení a , či o skutočnom priemere týchto vodičov d .

2.5 ADMITANCIA VEDENIA

Admitancia vedenia by sa mala rovnať súčtu všetkých parametrov kapacitného charakteru, ktoré ovplyňujú vedenie. Avšak, ako sme už naznačili aj vyššie, my zvod zanedbáme pre jeho nevelikú významnosť v našich aproximatických výpočtoch. Oстане nám teda iba nasledovný vzťah:

v2.5.1

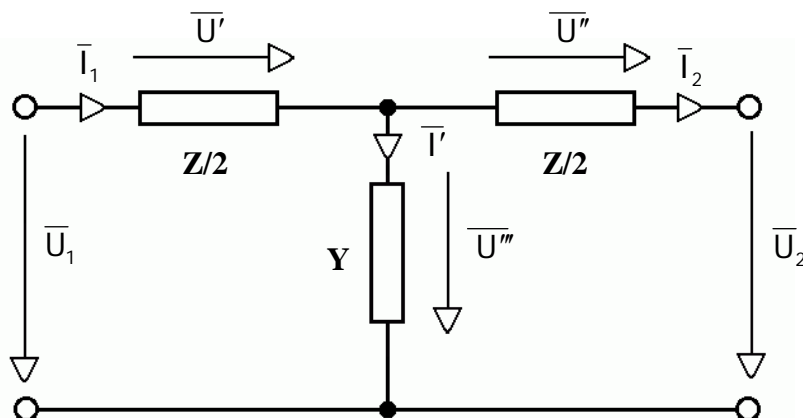
$$\bar{Y} = G + jB = G \rightarrow 0 + j511 \cdot 10^{-6} = 0 + j511 \cdot 10^{-6} = j0,000511$$

3. Výpočty vedení

3.1 NÁHRADNÁ SCHÉMA VEDENIA A FÁZOROVÝ DIAGRAM

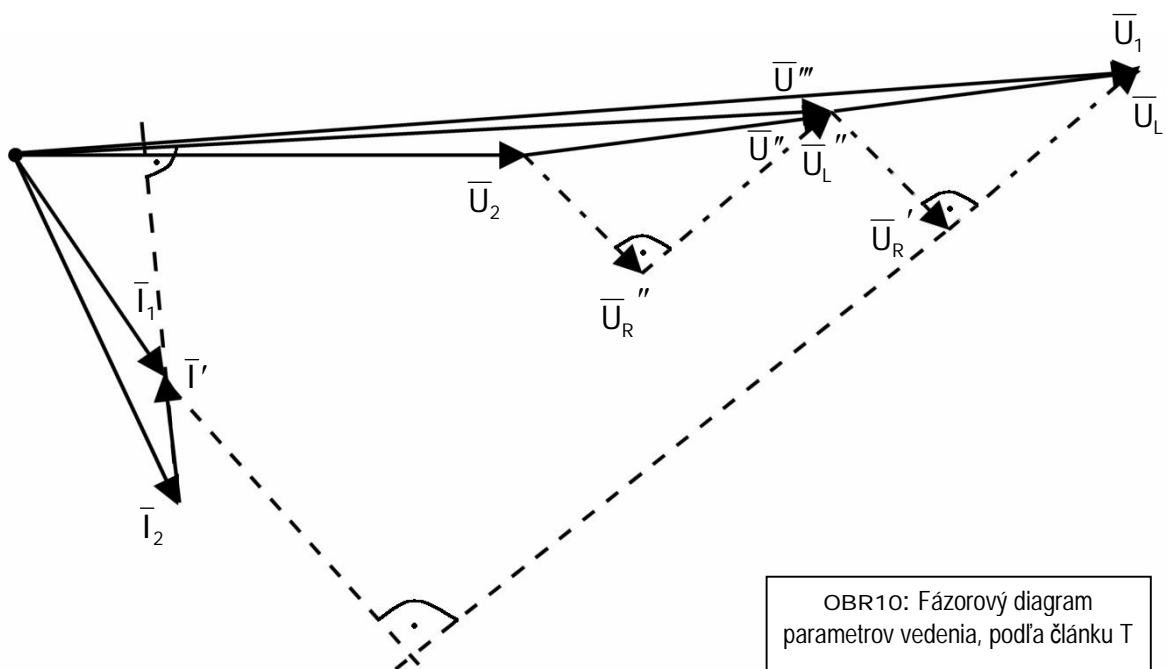
Keď už vieme, aké činitele a v akej miere ovplyňujú parametre vedenia, môžeme zostrojiť principiálnu schému vedenia. Náhradné prvky v nej budú potom symbolizovať všetky spomínané činitele, ktoré sú v reáli rozložené po celej dĺžke vedenia (viac-menej rovnomerne).

Ja som sa rozhodol použiť pre svoje výpočty náhradnú schému vedenia typu T, ktorá vyzerá nasledovne:



OBR9: Náhradná schéma parametrov vedenia VVN typu T

Na jej základe som potom zostrojil fázorový diagram – ten možno vidieť nižšie:



OBR10: Fázorový diagram parametrov vedenia, podľa článku T

Počas konštrukcie jednotlivých fázorov fáz. diagramu som postupoval v tomto poradí:

- 1) Ako prvé som nakreslil napätie U_2 , pretože z neho vychádzam ako z požiadavky, ktorú si uplatňuje zákazník na konci vedenia.
- 2) Zostrojil som prúd I_2 , ktorého smer musel byť kombináciou kapacitno-indukčnej záťaže, teda zvolil som uhol circa 45° .
- 3) K napätiu U_2 som pridal zložku úbytku na záťaži činného charakteru U_R'' , tak aby tento vektor bol vo fáze (teda rovnobežný) s už zostrojeným prúdom I_2 , ktorý záťažou $Z/2$ tečie.

- 4) Keďže napätie pri indukčnej záťaži predbieha prúd, zakreslil som fázor úbytku napätia na záťaži indukčného charakteru \mathbf{U}_L'' posunutý (teda predsunutý) o 90° voči prúdu \mathbf{I}_2 , ktorý záťažou $Z/2$ tečie.
- 5) Zo známych čiastkových zložiek \mathbf{U}_R'' a \mathbf{U}_L'' som potom zostrojil celkový úbytok napätia na kombinovanej záťaži $Z/2$, označený ako \mathbf{U}'' .
- 6) Teraz som bol schopný vyznačiť napätie označené ako \mathbf{U}''' .
- 7) Keď som spoznal vektorové vlastnosti \mathbf{U}''' , poľahky som mohol zostrojiť prúd \mathbf{I}' , keď som vedel, že prúd vyvolaný týmto napätím tečie cez záťaž s kapacitným charakterom – teda fázor tohto prúdu musel nevyhnutne predbiehať napätie o 90° .
- 8) Vďaka prúdu \mathbf{I}' a vzťahu podľa Kirchhoffovho zákona, a síce, že $\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}' + \mathbf{I}_2$ sme sčítaním vektorov dostali prúd \mathbf{I}_1 .
- 9) S prúdom \mathbf{I}_1 je vo fáze činná zložka úbytkov napätia \mathbf{U}_R' - teda toto napätie kreslím ako rovnobežku s týmto prúdom.
- 10) Opäť si spomeniem na fakt, že napätie predbieha pri indukčnej záťaži prúd, a tak zakreslím indukčnú (jalovú) zložku úbytkov napätia \mathbf{U}_L' posunutú o 90° voči prúdu, ktorý toto napätie spôsobuje – \mathbf{I}_1 .
- 11) Sčítaním čiastkových vektorov \mathbf{U}_R' a \mathbf{U}_L' dostaneme výsledný fázor úbytkov napätia \mathbf{U}' .
- 12) A nakoniec: vieme zostrojiť napätie na samom začiatku úseku vedenia, napätie \mathbf{U}_1 .

Z diagramu vidíme, že do siete vednia musíme dodať omnoho väčšie napätie \mathbf{U}_1 , než aké potrebujeme na výstupe (\mathbf{U}_2).

3.2 RIEŠENIE OBVODU

Podľa náhradnej schémy, ktorú sme zostavili v bode 3.1 môžeme pristúpiť k samotným výpočtom. Jednotlivé skalárne veličiny obvodu začneme považovať za vektory, teda pre nás fázory so svojím vlastným smerom, veľkosťou a orientáciou. Môžeme tak urobiť vďaka tomu, že naše fázory svojím pohybom opisujú kružnicu. Avšak na to, aby sme mohli operovať aj s *imaginárnou odmocninou z -1*, musíme zaviesť systém komplexných čísel. Ten spočíva v nanášaní reálnych čísel na horizontálnu os a imaginárnych čísel na vertikálnu os súradnicového systému. Tieto čísla nazývame *zložkami* komplexného čísla.

Pre operácie s imaginárnou zložkou komplexného čísla platí nasledovné:

v3.2.1

$$j^{4k} = j^0 = 1$$

$$j^{4k+1} = j^1 = j$$

$$j^{4k+2} = j^2 = -1$$

$$j^{4k+3} = j^3 = -j$$

Pre nás to znamená iba toľko, že pokiaľ budeme spoločne násobiť dve imaginárne zložky komplexného čísla, zmení sa znamienko na opačné pred ich súčinom:

v3.2.2

$$j \cdot j = j^2 = -1$$

Teda vďaka tomu, že sme zaviedli komplexné čísla a fázory do striedavého obvodu, môžeme ho riešiť ako jednosmerný. Z náhradnej schémy teda zostrojíme nasledovné vzorce, ktoré rozvedieme na menšie zložky veličín do takej miery, aby sme dostali výsledný vzorec, v ktorom budú figurovať výlučne veličiny, ktorých hodnoty poznáme:

v3.2.3

$$\bar{U}_1 = \bar{U}' + \bar{U}''$$

$$\bar{U}_1 = \frac{\bar{Z}}{2} \cdot \bar{I}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}''$$

$$\bar{U}_1 = \frac{\bar{Z}}{2} \cdot \bar{I}_1 + \bar{U}_2 + \frac{\bar{Z}}{2} \cdot \bar{I}_2$$

v3.2.4

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \bar{I}'$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \bar{Y} \cdot \bar{U}''$$

Vzorce v3.2.3 a v3.2.4 ďalej dôkladne upravíme, aby boli naše výpočty čo najprehľadnejšími. Do vzorca pre výpočet \mathbf{U}_1 dosadíme miesto \mathbf{I}_1 celý vzorec na jeho výpočet získaný vyššie. Osamostatníme \mathbf{U}_2 a \mathbf{I}_2 z jednotlivých vzťahov, aby sme dostali súčet ich súčinou s ostatnými parametrami:

v3.2.5

$$\bar{U}_1 = \frac{\bar{Z}}{2} \cdot \left[\bar{I}_2 + \bar{Y} \cdot \left(\frac{\bar{Z}}{2} \cdot \bar{I}_2 + \bar{U}_2 \right) \right] + \bar{U}_2 + \frac{\bar{Z}}{2} \cdot \bar{I}_2 = \left[1 + \frac{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}{2} \right] \bar{U}_2 + \left[\frac{\bar{Z}}{2} + \frac{\bar{Z}^2 \cdot \bar{Y}}{4} \right] \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 + \bar{Y} \cdot \left[\frac{\bar{Z}}{2} \cdot \bar{I}_2 + \bar{U}_2 \right] = \bar{Y} \cdot \bar{U}_2 + \left[1 + \frac{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}{2} \right] \bar{I}_2$$

v3.2.6

Vzniknutých násobiteľov násobiacich \mathbf{U}_2 a \mathbf{I}_2 si označíme latinskými písmenami a tieto zložky vyrátame samostatne:

$$\text{v3.2.7} \quad \bar{A} = 1 + \frac{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}{2} = 1 + \frac{(3,12 + j27,74) \cdot (j511 \cdot 10^{-6})}{2} = 0,99291243 + j0,00079716$$

$$\text{v3.2.8} \quad \bar{B} = \bar{Z} + \frac{\bar{Z}^2 \cdot \bar{Y}}{4} \downarrow = \bar{Z} = 3,12 + j27,74$$

$$\text{v3.2.9} \quad \bar{C} = \bar{Y} = j511 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{v3.2.10} \quad \bar{D} = \bar{A} = 0,99291243 + j0,00079716$$

*Násobiteľ B je zlomok natoľko malý, že ho možno zanedbať, pretože jeho vplyv na výslednú hodnotu je minimálny.

Predtým, ako sa pustíme do vyrátania hodnôt \mathbf{U}_1 a \mathbf{I}_1 , skontrolujme si, ktoré hodnoty veličín vo vzorci už poznáme, a ktoré ešte nie:

- všetky násobitele (**A**, **B**, **C**, **D**) sme už vyrátali vyššie,
- poznáme združenú hodnotu $\mathbf{U}_2 = 400 \text{ kV}$, avšak náš prepočet je názorný, týkajúci sa iba jednej fázy – preto potrebuje fázovú hodnotu \mathbf{U}_2 :

v3.2.11

$$U_f = \sqrt{3} \cdot U_2 = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3 = 231 \text{ [kV]}$$

- nepoznáme hodnotu výstupného prúdu \mathbf{I}_2 . Vzorec na jeho výpočet si odvodíme od vzorca na výpočet výkonu:

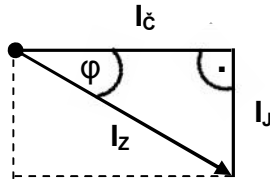
v3.2.12

$$P_2 = U_2 \cdot I_{2Z} \cdot \cos \dots \Rightarrow I_{2Z} = \frac{P}{U_2 \cdot \cos \Phi}$$

v3.2.13

$$I_{2Z} = \frac{432 \cdot 10^6}{231 \cdot 10^3 \cdot 0,832} = 2247,8$$

Táto hodnota prúdu je však **zdanlivá**. Ak chceme pracovať s reálnou a imaginárnou zložkou komplexnej hodnoty prúdu I_2 , musíme si dopočítať prúd I_2 **činný** a prúd I_2 **jalový**. To všetko možno vďaka zostrojenému fázorovému diagramu na OBR10. Pre názornosť vyberieme inkriminovaný úsek k nahliadnutiu do našich úvah:

OBR11: Zložky prúdu I_2 

v3.2.14

$$I_c = I_Z \cdot \cos \Phi = 2247,8 \cdot 0,832 = 1870,2$$

v3.2.15

$$I_j = I_Z \cdot \sin \Phi$$

My poznáme **účinník** a nie uhol Φ , a preto, aby sme mohli dopočítať I_j , potrebujeme tento uhol najskôr vyjadriť:

v3.2.16

$$\cos \Phi = 0,832 \Rightarrow \Phi = 33,7^\circ$$

$$I_j = I_Z \cdot \sin 33^\circ = 2247,8 \cdot 0,555 = 1247,2$$

Aby sme tieto dve zložky komplexného charakteru zložili do komplexného čísla správne, musíme sa opäť pozrieť na OBR11. Tam vidíme, že reálna časť (I_c) je na kladnej osi a imaginárna časť (I_j) kopíruje zápornú os. Preto zložky jalového a činného výkonu zložíme do vektora nasledovne:

v3.2.17

$$I_2 = 1870,2 - j1247,2$$

Teraz môžeme U_1 a I_1 bezpečne vypočítať:

$$\bar{U}_1 = \bar{A} \cdot \bar{U}_2 + \bar{B} \cdot \bar{I}_2$$

$$\bar{U}_1 = [(0,99291243 + j0,00079716) \cdot 231 \cdot 10^3] + [(3,12 + j27,74) \cdot (1870,2 - j1247,2)]$$

$$\bar{U}_1 = 229362,8 + j184,14 + 5835 - j3891,3 + j51879,3 + 34597,3$$

$$\bar{U}_1 = 269795,1 + j48172,1$$

$$\bar{I}_1 = \bar{C} \cdot \bar{U}_2 + \bar{D} \cdot \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_1 = [j511 \cdot 10^{-6} \cdot 231 \cdot 10^3] + [(0,99291243 + j0,00079716) \cdot (1870,2 - j1247,2)]$$

$$\bar{I}_1 = j118 + 1856,9 - j1238,4 + j1,5 + 0,994217952$$

$$\bar{I}_1 = 1857,9 - j1118,9$$

Ak porovnáme naše výsledky s fázorovým diagramom, zistíme, že údaje navzájom korešpondujú: Napätie \mathbf{U}_1 má obe zložky komplexného čísla kladné (teda reálne), zatiaľ čo prúd \mathbf{I}_1 má kladnú reálnu zložku a zápornú imaginárnu zložku, tú s j .

Keď poznáme napätie a prúd, nič nám nezabráni vo výpočte výkonu podľa vzorca v3.2.18.

$$\begin{aligned} \text{v3.2.18} \quad \bar{S}_1 &= \bar{U}_1 \cdot \dot{\bar{I}}_1 \\ \bar{S}_1 &= (269795 + j48172) \cdot (1857,9 + j1118,9) \\ \bar{S}_1 &= 501252130,5 + j301873625,5 + j89498758,8 - 53899650,8 \\ \bar{S}_1 &= 447352479,7 + j391372384,3 \end{aligned}$$

Vo vzorci v3.2.18 si, prosím, povšimnime krúžok nad označením fázoru prúdu. Tento symbol znázorňuje konjunkciu celej hodnoty fázoru, čo má za následok zmenu znamienka medzi reálnou a imaginárnou zložkou komplexného čísla tohoto fázoru. Hovoríme potom o tzv. prúde konjugovanom.

Z takto vypočítaného zdanlivého výkonu \mathbf{S}_1 už poľahky, rozlíšením reálnej a imaginárnej zložky, určíme výkony jalový a činný:

$$\begin{aligned} \text{v3.2.19} \quad P_{\text{ČINNÝ}(1)} &\Rightarrow P_1 = 447 \text{ [MW]} \\ \text{v3.2.20} \quad P_{\text{JALOVÝ}(1)} &\Rightarrow Q_1 = 391 \text{ [MVar]} \end{aligned}$$

Teraz môžeme zistiť výkonové diferencie rozdielom dodaného výkonu na začiatku vedenia a doručeného výkonu na konci vedenia:

$$\text{v3.2.21} \quad \Delta P^* = P_1 - P_2 = 447 - 432 = 15 \text{ [MW]}$$

Na výlučnom základe hodnôt, ktoré sme vypočítali doposiaľ, nevieme povedať, či je preprava energie naším vedením efektívna alebo naopak, nie. Preto musíme naše výpočty na niečo vzťahovať, zohľadniť voči niečomu. Ak straty výkonu vzťahujeme na doručený výkon \mathbf{P}_2 , zistíme percentuálne rozdiely:

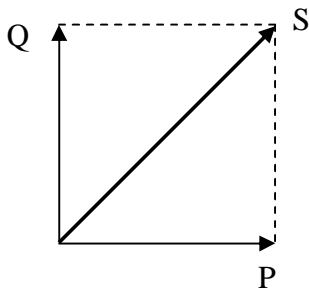
$$\text{v3.2.22} \quad \Delta P = \frac{\Delta P^*}{P_2} \cdot 100 = 3,47\%$$

Výsledok zhodnotíme v závere. Teraz dopočítajme účinník $\cos \varphi_1$:

$$\text{v3.2.23} \quad \frac{P_1}{S_1} = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{U_1 \cdot I_1} = \cos \varphi_1$$

Zo vzorca v3.2.23 vidíme, že podielom činného a zdanivého výkonu dostaneme účinník. Činný výkon máme, vid' v3.2.19., a zo vzorca v3.2.18 sme síce dostali zdanlivý výkon, ale iba jeho komplexný tvar. Nato, aby sme mohli vypočítať z komplexnej zložky zdanlivého výkonu \mathbf{S}_1 (alebo z vydedukovaných hodnôt vo vzorcoch v3.2.19,20) určiť reálne číslo, reálnu hodnotu, musíme si najskôr nakresliť obrázok, pre objasnenie ďalších úvah:

OBR12: Zložky výkonu



Z obrázku OBR12 je potom jasné, že zdanlivý výkon S_1 vypočítame pomocou pytagorovej vety:

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}$$

v3.2.24

$$S_1 = \sqrt{447352479,7^2 + 391372384,3^2}$$

$$S_1 = 621,6 \text{ [MVA]}$$

Vypočítajme teda účinník, podľa vzorca v3.2.19:

v3.2.25

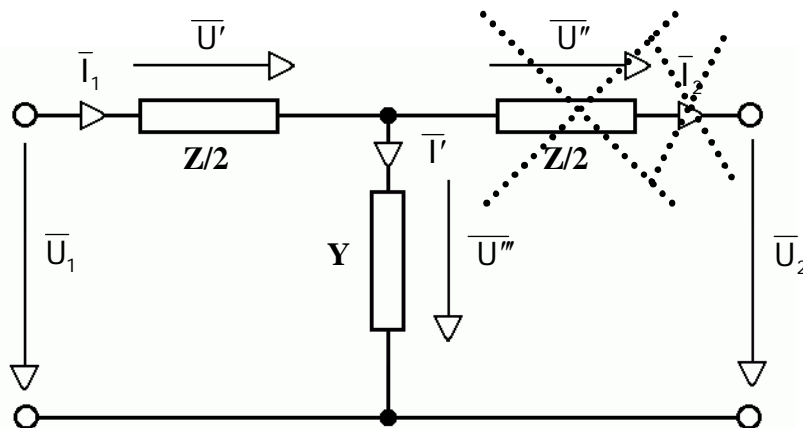
$$\cos \varphi_1 = \frac{447}{621,6} = 0,719 \text{ [/]}$$

Výsledok zhodnotíme v samom závere.

3.3 FERANTIHO JAV

(stav vedenia nakrátko)

Ferantio jav vzniká v špeciálnom stave vedenia – a síce, keď vedenie pracuje **nakrátko**. To znamená, že na výstupe nie je žiaden odberateľ, ktorý by vedenie zaťažoval svojimi požiadavkami na výkon P_2 . Pre nás z toho vyplýva, že principiálna schéma s náhradnými prvkami z obrázku OBR9 sa zmení asi nasledovne:



OBR9: Náhradná schéma parametrov vedenia VVN, typu T, stav nakrátko

Pri stave nakrátko si prúd I_2 môžeme odmyslieť hneď nazačiatku. Ďalej, keďže uvažujeme o vedení bez záťaže, záťaž, ktorou by tento prúd tiekol si môžeme odmyslieť. Pretože podľa Ohmovho zákona je odpor definovaný ako podiel napätia a prúdu – keď nepotečie prúd, nebude mať čo vyvolať odpor. Potom môžeme povedať, že prúd $I_1 = I'$.

Vypočítajme hodnoty prúdu a napätia na vstupe pri stave vedenia nakrátko:

$$\bar{U}_{10} = \bar{A} \cdot \bar{U}_2 + \bar{B} \cdot \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_{10} = \bar{C} \cdot \bar{U}_2 + \bar{D} \cdot \bar{I}_2$$

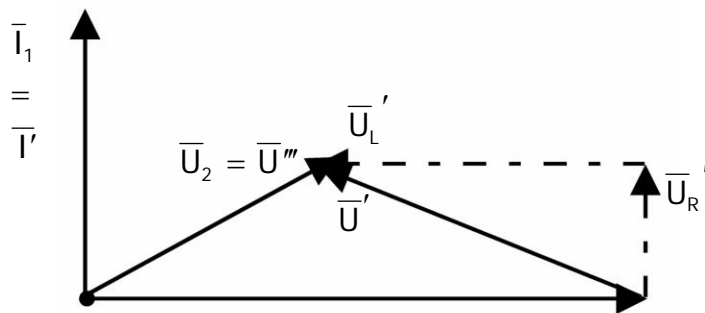
$$\bar{I}_{10} = \bar{C} \cdot \bar{U}_2 = j511 \cdot 10^{-6} \cdot (231 \cdot 10^3) = j118$$

$$\bar{U}_{10} = \bar{A} \cdot \bar{U}_2$$

$$\bar{U}_{10} = (0,99291243 + j0,00079716) \cdot (231 \cdot 10^3)$$

$$\bar{U}_{10} = 229362,8 + j184,14$$

Zostrojme fázorový diagram vedenia VVN v stave nakrátko:



Graf zhodnotíme v samom závere tohto projektu.

4. Záver

V úvode sme zistili, že na vedenie VVN a prenos energie vplyvajú nežiadúce účinky ako odpor, indukcia či kapacita, ktoré vznikajú prirodzene, bez zásahu človeka. Postupy, ako zmenšiť tieto vplyvy sme načrtli už vyššie.

Teraz sa však budeme zaoberať výsledkom zo vzorca v3.2.22. Táto hodnota strát výkonu vztiahnutá na výstupný výkon, nám prezrádza, aké percentuálne diferencie výkonu vznikajú počas prenosu energie. Naše vedenie vykázalo stratu 3,47%. To znamená, že eventuálne by sa na našom vedení mal stratiť výkon:

$$P_{\text{STRATOVÝ}} = \frac{3,47 \cdot 447}{100} = 15 \text{ [MW]}$$

Teraz vieme porovnávať: Na našom vedení sa pri prenose 110 km stratí taký výkon, ktorý zodpovedá výkonovej spotrebe cirka päťdesiat tisícového mesta Nové Zámky. To je pomerne veľká strata, avšak v porovnaní s prenášaním výkonom je to strata akceptovateľná (3,47%).

Zo vzorca v3.2.19 sme získali účinník na začiatku vedenia (0,719). Keď ho porovnáme s účinníkom na konci vedenia (0,832, zistíme, že **cos φ₂ je väčší**. Je takýto stav možný?

Áno, takýto stav na vedení možno dosiahnuť kompenzáciou účinníku. A ako sme sa učili, kompenzovať účinník sa dá zvýšenou kapacitou. Tá eliminuje množstvo

rozptylového magnetického toku, indukovaného indukčnosťou a tým znižuje jalový zložku. Väčšia časť výkonu sa preto prepraví bez strát. To znamená, že naše vedenie nadobúda na svojej trase Rimavská Sobota – Šaca také parametre, ktoré vyvolávajú túto kapacitu. Ktoré parametre to sú? Sú to priemery vodičov, vzájomná vzdialenosť vodičov vo zväzku a vzájomná vzdialenosť vodičov na stožiaroch. Keby tieto parametre boli čo najmenšie, menovateľ zlomku zo vzorca v2.4.4 by bol malý, teda výsledok zlomku by vzrástol – a sním aj hodnota kapacitnej vodivosti.

Túto časť môžeme teda uzavrieť s konštatovaním, že kapacita spôsobila väčšie zmeny ako indukčnosť a kompenzovala účinník. Pre naše vedenie bola jej existencia po tejto stránke priaznivá. Tiež sme však zistili, že k stratám počas prenosu prišlo, teda na začiatku vedenia musíme dodať väčšie napätie, než aké požadujeme na výstupe.

Ďalej sme sa zmienili o tzv. **Ferantihovom jave**. Výsledok zo vzorca v3.3.1 nám hovorí o tom, že i napriek tomu, že na výstupe nemáme záťaž, a teda neodoberáme z vedenia ani žiaden prúd, na výstupe sa predsa objaví 118 A. Týchto 118 ampérov sa zrejme indukuje opäť vďaka kapacite vedenia. Ferantihov jav však nebezpečný a môže poškodiť transformátory vždy vtedy, ak dochádza k zaťaženiu vedenia neprirodzeným výkonom: teda buď v stave nakrátko, alebo aj vtedy, ak sú hodnoty U_1 a U_2 približne rovnaké.

Kapacita je teda parameter na jednej strane užitočný, ktorý kompenzuje účinník prenosu energie, no na druhej strane dokáže spôsobiť škody, pokiaľ je užívateľ náhle odpojený.