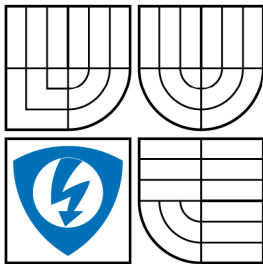


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

USTÁLENÝ CHOD VEDENÍ 110 KV STEADY-STATE OPERATION OF 110 KV POWER LINE

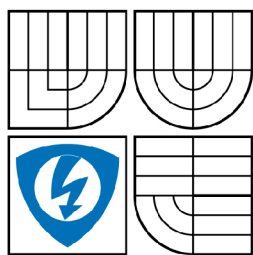
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAROSLAV PASTOREK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. VLADIMÍR BLAŽEK, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Jaroslav Pastorek

ID: 112055

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Ustálený chod vedení 110 kV

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- Pojednejte o metodách řešení vedení vvn.
- Na konci trojfázového transponovaného vedení se jmenovitým napětím $U_n = 110$ kV, délky 150 km a se zadanými parametry je odebíraný činný výkon 20 MW, účinník odběru je 0,8 ind. a napětí $U_2 = U_n = 110$ kV. Vhodnou metodou určete:
 - poměry na začátku vedení,
 - poměry na vedení při chodu naprázdno a nakrátko, jestliže uvažujeme v obou případech na začátku $U_1 = U_n = 110$ kV.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 31.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

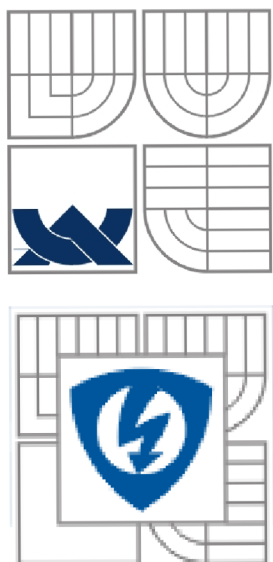
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citácia práce:

PASTOREK, J. *Ustálený chod vedení 110 kV*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 38 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Prehlasujem, že som svoju **bakalársku prácu** vypracoval samostatne a použil som iba podklady (literatúru, projekty, SW atď.) uvedené v priloženom zozname.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

Ustálený chod vedení 110 kV

Jaroslav Pastorek

vedoucí: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2010

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering



Bachelor's Thesis

Steady-state operation of 110 kV power line

by

Jaroslav Pastorek

Supervisor: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Brno University of Technology, 2010

Brno

ABSTRAKT

Bakalárska práca rieši problematiku ustáleného chodu vedenia 110 kV. Je všeobecne známe, že toto vedenie patrí do distribučnej sústavy napäťovej hladiny vvn (veľmi vysoké napätie) a používa sa na prenos veľkého množstva energie na veľké vzdialenosti. Základným predpokladom u tohto prenosu množstva energie je dosiahnuť čo najväčšiu účinnosť. Preto sú vypracované metódy, pomocou ktorých pri známych pomeroch na jednej strane vedenia vieme vypočítať pomery na druhom konci vedenia. Tieto metódy môžeme rozdeliť na metódy presné, približné a grafické. Pri približných metódach je použitá náhrada vedenia T – článkom a Π – článkom, ktoré sú najpoužívanejšie. Ku grafickej metóde je uvedený iba stručný popis. Pred počítaním týchto metód je v práci popísaný postup pre určenie jednotlivých parametrov vonkajších vedení.

V praktickej časti je na základe zadaného príkladu uvedený výpočet pre jednotlivé metódy. Zadaný príklad sa týka výpočtu pomerov na začiatku vedenia a pomerov pri chode vedenia nakrátko a naprázdno. V závere časti je stručné zhodnotenie a porovnanie výsledkov.

Vedenie 110 kV môže byť riešené buď ako káblové vedenie uložené v zemi, alebo ako vonkajšie vedenie zavesené na stožiaroch. Káblové vedenie pre 110 kV sa však používa iba ojedinele, takže bakalárska práca je zameraná na vonkajšie vedenia.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: 110 kV; chod nakrátko; chod naprázdno; napätie; parametre vonkajších vedení; presné riešenie; približné riešenie; prúd; ustálený chod; účinnosť; zdanlivý výkon

ABSTRACT

This Bachelor's thesis addresses the steady operation of 110 kV power lines. It is well known that these lines are used within the distribution system of very high voltage levels and are used to transfer large amounts of energy over long distances. The essential prerequisite for the transfer of such an amount of energy is to achieve the greatest efficiency possible. Therefore, there are methods developed, by which under known circumstances on one end of the line we can calculate the line ratios at the other end. These methods can be classified into exact, approximate and graphic methods. With approximate methods, T – element and Π – element, the most popular ones, are used. Only a brief description of the graphic method is given. Before the calculations of these methods, a procedure for determining various parameters of the external line is described.

In the practical part, calculations based on the given example are listed. The example addresses calculation of ratios at the start of the line and ratios during short-circuit and freewheeling operation. The end contains a brief summary and comparison of the results.

100 kV lines can be either designed either as buried cables or external lines hanging from pylons. Buried cables are rarely used for 100 kV, so this Bachelor's thesis is focused on external lines.

KEY WORDS: 110 kV; apparent power; approximate solution; current; efficiency; freewheeling operation; parameters of external lines; short-circuit operation; stable operation; the exact solution; voltage

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ZOZNAM TABULIEK.....	10
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK.....	11
1 ÚVOD	13
2 ELEKTRICKÉ PARAMETRE VEDENÍ.....	14
2.1 Parametre vonkajších vedení	14
2.1.1 Činný odpor	14
2.1.2 Indukčnosť.....	15
2.1.3 Kapacita.....	17
2.1.4 Konduktancia (zvod)	18
2.1.5 Zväzkové vodiče.....	18
2.2 Stanovenie prevádzkových parametrov vedenia meraním	18
3 ELEKTRICKÉ VEDENIA VVN V USTÁLENOM STAVE.....	20
3.1 Presné riešenie	20
3.1.1 Priečna kompenzácia.....	23
3.2 Približné riešenie	23
3.2.1 T – článok.....	23
3.2.2 Π – článok	25
3.3 Vedenie pri chode naprázdno a nakrátko	26
3.4 Grafické riešenie.....	28
4 RIEŠENIE ZADANÉHO PRÍKLADU	29
4.1 Výpočet s presným riešením	29
4.2 Výpočet pomocou Π - článku	31
4.3 Výpočet pomocou T - článku.....	32
4.4 Pomery na vedení pri chode naprázdno a nakrátko	33
5 ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV.....	36
LITERATÚRA.....	38

ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 1-1: Stožiare vedenia 110 kV</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 2-1: Znázornenie trojvodičového vedenia</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2-2: Transpozícia vedenia.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2-3: Znázornenie kapacít nesúmerného trojfázového transponovaného vedenia.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3-1: Priečna kompenzácia vedenia vvn</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-2: T – článok.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3-3: Fázorový diagram T – článku pri zanedbaní konduktancie</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-4: II – článok</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-5: Fázorový diagram II – článku pri zanedbaní konduktancie</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3-6: Fázorový diagram II – článku pri chode naprázdno</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 3-7: Fázorový diagram II – článku pri chode nakrátko</i>	<i>28</i>

ZOZNAM TABULIEK

<i>Tab. 2-1: Rezistivita a teplotný súčiniteľ odporu v najpoužívanejších materiáloch vodičov.....</i>	<i>15</i>
<i>Tab. 5-1: Výsledky združeného napätia, prúdu a komplexného výkonu na začiatku vedenia.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 5-2: Výsledky účinníka na začiatku vedenia , účinnosti a strát činného výkonu</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 5-3: Absolútne relatívne výchylky výsledných hodnôt približného riešenia od presného.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 5-4: Výsledky pomerov vedenia pri chode naprázdno a nakrátko.....</i>	<i>37</i>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Značka	Veličina	Značka jednotky
A	Blondelová konštanta	-
B	Blondelová konštanta	Ω
B_k	kapacitná susceptancia vedenia na jednotku dĺžky	S/km
C	Blondelová konštanta	S
C_k	kapacita vedenia na jednotku dĺžky	nF/km
C_0	kapacita proti zemi	nF
C_p	prevádzková kapacita 3f. transponovaného vedenia	nF/km
C_v	vzájomná kapacita vodičov	nF
D	Blondelová konštanta	-
G_k	konduktancia vedenia na jednotku dĺžky	S/km
I_1	fázor prúdu na začiatku vedenia	A
I_{10}	fázor prúdu na začiatku vedenia pri chode naprázdno	A
I_{1k}	fázor prúdu na začiatku vedenia pri chode nakrátko	A
I_2	fázor prúdu na konci vedenia	A
I_{2k}	fázor prúdu na konci vedenia pri chode nakrátko	A
L_k	indukčnosť vedenia na jednotku dĺžky	mH/km
L_p	prevádzková indukčnosť 3f. transponovaného vedenia	mH/km
P_1	činný výkon na začiatku vedenia	W
Q_1	jalový výkon na začiatku vedenia	VAr
R_k	rezistancia vedenia na jednotku dĺžky	Ω /km
R_0	činný odpor vedenia	Ω
S_1	zdanlivý výkon na začiatku vedenia	VA
U	úsek vedenia	km
U_1	fázor napätia na začiatku vedenia	V
U_{10}	fázor napätia na začiatku vedenia pri chode naprázdno	V
U_{20}	fázor napätia na konci vedenia pri chode naprázdno	V
U_{1k}	fázor napätia na začiatku vedenia pri chode nakrátko	V
U_2	fázor napätia na konci vedenia	V
X_k	induktívna reaktancia na jednotku dĺžky	Ω /km
Y_{00}	prevádzková admitancia vedenia naprázdno	S
Z_{10}	impedancia naprázdno na začiatku vedenia	Ω
Z_{1k}	impedancia nakrátko na začiatku vedenia	Ω
Z_{kk}	prevádzková impedancia vedenia nakrátko	Ω
Z_v	charakteristická impedancia vedenia	Ω
a	osová vzdialenosť lán	cm
d	vzdialenosť jednotlivých fázových vodičov	m
f	frekvencia	Hz
k_l	činiteľ zväčšenia odporu vplyvom krútenia drôtov	1
k_p	činiteľ zväčšenia odporu vplyvom priehybu vedenia	1
k_s	činiteľ skinefektu	1
l	dĺžka vedenia	km
n	počet lán vo zväzku	1
r	polomer vodiča	mm
r_e	fiktívny polomer	cm

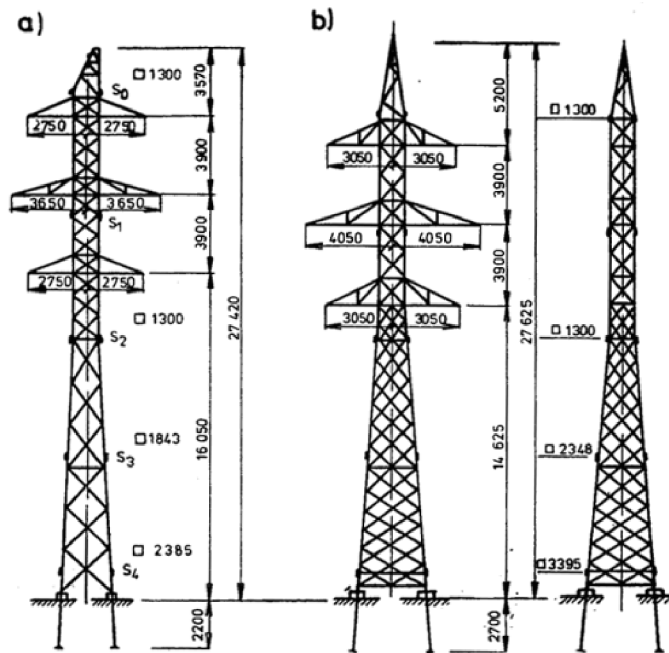
s	prierez vodiča	mm^2
y_k	priečna admitancia vedenia na jednotku dĺžky	S/km
z_k	pozdlžna impedancia vedenia na jednotku dĺžky	Ω/km
Φ	magnetický tok	Wb
α	teplotný súčiniteľ odporu	K^{-1}
α_{00}	argument prevádzkovej admitancie naprázdno	$^\circ$
α_{kk}	argument prevádzkovej impedancie nakrátko	$^\circ$
γ_k	činiteľ šírenia vlny ma jednotku dĺžky	km^{-1}
η	účinnosť prenosu	$\%$
μ_r	relatívna permeabilita materiálu vodiča	-
v	konečná teplota vodiča	K
v_0	počiatočná teplota vodiča	K
π	Ludolfovo číslo	-
ρ	merný odpor vodiča	$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$
φ_1	fázový posun na začiatku vedenia	$^\circ$
φ_{10}	fázový posun na začiatku vedenia pri chode naprázdno	$^\circ$
φ_{1k}	fázový posun na začiatku vedenia pri chode nakrátko	$^\circ$
v_{vn}	veľmi vysoké napätie	
AlFe	oceľohliníkový vodič	

1 ÚVOD

Ako už bolo povedané, vedenie 110 kV tvorí distribučnú sieť napäťovej hladiny vvn. V roku 1927 na území Českej republiky bol postavený prvý diaľkový prenos z Ervénic do Prahy práve týmto vedením a do roku 1950 tvorilo vedenie 110 kV hlavnú prenosovú sústavu [3]. Postupným rozvojom a zväčšením odberov elektrickej energie 110 kV sieť zažala preberať funkciu distribučnej siete a prenosovú funkciu prebralo vedenie 400 kV a 220 kV. Celková dĺžka vedenia 110 kV v súčasnosti na území ČR presahuje 12 000 km.

Vedenie 110 kV je výhradne prevedené ako trojfázové. Využíva sa najmä v mestách, alebo v priemyselných oblastiach buď ako káblové vedenie uložené v zemi, alebo ako vonkajšie vedenie uložené na stožiaroch. Káblové vedenie sa používa zriedkavo, pochopiteľne vtedy ak nám z geografického hľadiska nevyhovuje vonkajšie vedenie. Zároveň si musíme pripomenúť, že káblové vedenie vyžaduje väčšie náklady na prevádzku.

Prevedenie vonkajšieho vedenia uloženého na stožiaroch už každý z nás iste videl. Práve na základe tvaru a prevedenia stožiarov môžeme určiť o aké vedenie napäťovej hladiny sa jedná. Typickými stožiarimi charakterizujúcimi vonkajšie vedenia 110 kV ukazuje obr. 1-1.



Obr. 1-1: Stožiare vedenia 110 kV

Hlava stožiara má tvar tzv. súdka. Stožiar na ľavej strane a) predstavuje nosný a na pravej strane b) vystužený stožiar. Obidva typy prevedenia sú určené pre dvojité vedenie 110 kV so zemným lanom na vrchu stožiara. Vystužený stožiar má hrubší profil a je namáhaný s väčšími ohybovými momentmi.[7]

2 ELEKTRICKÉ PARAMETRE VEDENÍ

Základnými prvkami elektrizačnej sústavy sú vedenia, transformátory, reaktory (vzduchové tlmivky), kompenzačné kondenzátory, spúšťacie tlmivky apod. Súvislosť medzi napätím a prúdom v prvkoch elektrizačnej sústavy vyjadrujeme pomocou parametrov. Rozoznávame štyri základné parametre: činný odpor R , indukčnosť L v pozdĺžnom smere prenosu elektrickej energie, zvod G a kapacitu C v priečnom smere [1].

Pri riešení ustálených stavov v sústavách so striedavým prúdom s frekvenciou 50 Hz sa zavádzajú odvodené parametre, t.j. indukčná reaktancia $X = 2\pi \cdot f \cdot L$, kapacitná susceptancia $B = 2\pi \cdot f \cdot C$, pozdĺžna impedancia $Z = R + jX$ a priečna admitancia $Y = G + jB$.

2.1 Parametre vonkajších vedení

Parametre vonkajších vedení sa vyjadrujú v merných jednotkách pripadajúcich na 1 km ich dĺžky.

Pozdĺžna impedancia

$$\mathbf{z}_k = R_k + jX_k \quad (\Omega / km), \quad (2.1)$$

priečna admitancia

$$\mathbf{y}_k = G_k + jB_k \quad (S / km), \quad (2.2)$$

kde R_k je rezistancia vedenia na jednotku dĺžky, X_k je indukčná reaktancia vedenia na jednotku dĺžky, G_k je konduktancia vedenia na jednotku dĺžky, B_k je kapacitná susceptancia na jednotku dĺžky.

Parametre vonkajších vedení sú závislé na materiály, konštrukcii vodičov, (drôty, laná, dvojmateriálové laná), izolácii a usporiadaní vodičov v hlave stožiaru [1].

Vodiče vonkajších vedení sa zhotovujú najčastejšie z hliníka alebo medi, výnimočne z ocele alebo bronzu. Vodičmi vonkajších vedení sú drôty a laná. V prípade pre vedenie 110kV sa používajú laná dvojmateriálové – oceľohliníkové (AlFe). Dvojmateriálové laná spájajú dobré mechanické vlastnosti ocele (duše) s dobrými elektrickými vlastnosťami druhého kovu (Al).

2.1.1 Činný odpor

Pre stanovenie činného odporu musíme rešpektovať viacero vplyvov: materiál vodiča, teplotu, skin efekt (pri striedavom prúde), predĺženie dĺžky vodiča vplyvom krútenia vodičov u lán, odchýlku skutočného prierezu od menovitého, predĺženie vplyvom priehybu, nerovnomernosť prierezu a na prechodovom odpore v spojoch.

Činný odpor je závislý na materiálových vlastnostiach vodičov, vyjadrených merným odporom ρ , dĺžkou l a prierezom s podľa vzťahu

$$R_0 = \frac{\rho \cdot l}{s} \quad (\Omega; \Omega mm^2 m^{-1}, m, mm^2), \quad (2.3)$$

ktorý je platný pre jednosmerný prúd určitej teploty. Pre zmenu teploty merného odporu platí

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_0)] \quad (\Omega mm^2 m^{-1}; \Omega mm^2 m^{-1}, K^{-1}, K), \quad (2.4)$$

kde ρ_0 je rezistivita pri počiatkovej teplote ϑ_0
 α je teplotný súčiniteľ odporu (viď Tab. 2-1).

Počiatočnou teplotou pre výpočet odporu vodičov je teplota 20°C. Vplyv rozdielnej teploty na činný odpor oproti teplote ϑ_0 sa vyjadruje pomocou vzťahu

$$k_{\vartheta} = \frac{R_{\vartheta}}{R_{\vartheta_0}} = 1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_0) \quad (-), \quad (2.5)$$

kde R_{ϑ} , R_{ϑ_0} sú rezistancie pri teplote ϑ a ϑ_0

Tab. 2-1: Rezistivita a teplotný súčiniteľ odporu v najpoužívanejších materiáloch vodičov

Materiál	Rezistivita pri 20°C [$\Omega\text{mm}^2/\text{km}$]	Teplotný súčiniteľ odporu [1/°C]
meď (Cu)	17,9	$4,17 \cdot 10^{-3}$
hliník (Al)	30,0	$3,87 \cdot 10^{-3}$
oceľ (Fe) – podľa pevnosti	200,0	$4,8 \cdot 10^{-3}$

Pre vedenie ,ktorým prechádza striedavý prúd môžeme napísať vzťah

$$R_{st} = k_s \cdot k_l \cdot k_p \cdot R_0 \quad (\Omega), \quad (2.6)$$

kde k_s je činiteľ, ktorý rešpektuje predovšetkým vplyv skinefektu (nerovnomerné rozloženie prúdu v priereze vodiča). Jeho hodnota je približne 1,1. Činiteľ k_l predstavuje u lana zväčšenie odporu oproti plnému prierezu drôtu jednosmernej plochy. Pre AlFe lano je hodnota činiteľa približne 1,04. Činiteľ k_p vyjadruje zväčšenie odporu vplyvom priehybu vedenia. Jeho približná hodnota je 1,02 [2].

2.1.2 Indukčnosť

Pri viacvodičových vedení, vzhľadom nevelkej vzdialenosti medzi vodičmi (susednými fázami), vzniká časovo premenné magnetické pole od prúdu v jednom vodiči, ktoré spôsobuje indukciu napätia nie len v tomto vodiči ale aj v ostatných vodičoch [1].

Súhrn indukčných vplyvov na jeden obvod, fázu, vyjadrujeme pomocou prevádzkovej indukčnosti vedenia. U trojfázovej sústave má pojem prevádzková indukčnosť zmysel iba u vedenia symetrizovaného so symetrickou záťažou. Potom môžeme pre indukčnosť vodiča použiť statickú definíciu

$$L = \frac{\phi}{i} \quad (H; \text{Wb}, A), \quad (2.7)$$

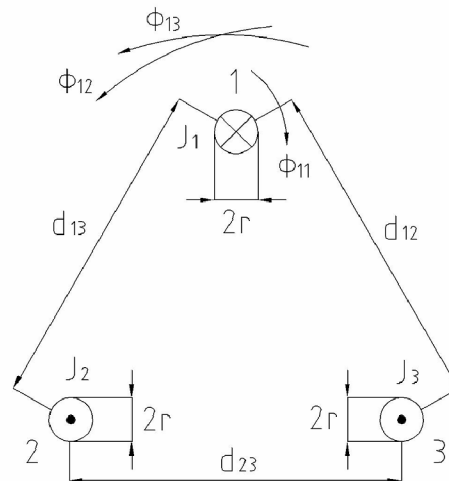
kde sa magnetický tok ϕ vzťahuje k prúdu i jednej fázy. V prípade nesúmerného vedenia, nesúmernej záťaže, alebo kombináciou predošlých prípadov, je treba indukčné vplyvy uvažovať oddelene pomocou vlastnej, vzájomnej indukčnosti a prúdov v príslušných obvodoch.

2.1.2.1 Indukčnosť trojvodičového vedenia

Pre uľahčenie predpokladajme, že vodiče všetkých troch fáz sú z rovnakého materiálu, majú rovnaký prierez a pre okamžité hodnoty prúdov vo fázach platí

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0, \quad (2.8)$$

to znamená, že sústava prúdov je vyvážená.



Obr. 2-1: Znáozornenie trojvodičového vedenia

Podľa vzťahu (2.8) a s využitím statickej definície indukčnosti (2.7), po úpravách dostaneme pre prevádzkové indukčnosti nesúmerného trojfázového vedenia vzťahy:

$$\left. \begin{aligned} L_{p1} &= 0,46 \log \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{13}}}{r} + 0,05 \cdot \mu_r \\ L_{p2} &= 0,46 \log \frac{\sqrt{d_{12} \cdot d_{23}}}{r} + 0,05 \cdot \mu_r \\ L_{p3} &= 0,46 \log \frac{\sqrt{d_{13} \cdot d_{23}}}{r} + 0,05 \cdot \mu_r \end{aligned} \right\} \quad (mH / km), \quad (2.9)$$

kde d_{12} , d_{13} a d_{23} sú vzdialenosti jednotlivých vodičov (viď Obr. 2-1), r je polomer vodičov a μ_r je relatívna permeabilita materiálov vodičov.

2.1.2.2 Transpozícia vodičov

V predchádzajúcej podkapitole sme zistili, že trojfázové vedenie s rôznymi vzdialenosťami medzi vodičmi spôsobuje rôzne indukčnosti vedenia (2.9). Dôsledkom toho vzniká nesúmernosť napätí na konci úseku aj v prípade, že vedenie je napájané so súmernými napätiami a zaťaženie je taktiež symetrické. Tento fakt spôsobuje zhoršenie kvality a hospodárnosti dodávky elektrickej energie a má negatívny vplyv aj na chod trojfázových spotrebičov. Ďalej nesymetria prúdov má za následok zvýšenie strát výkonu a energie vo vedení i v spotrebičoch.

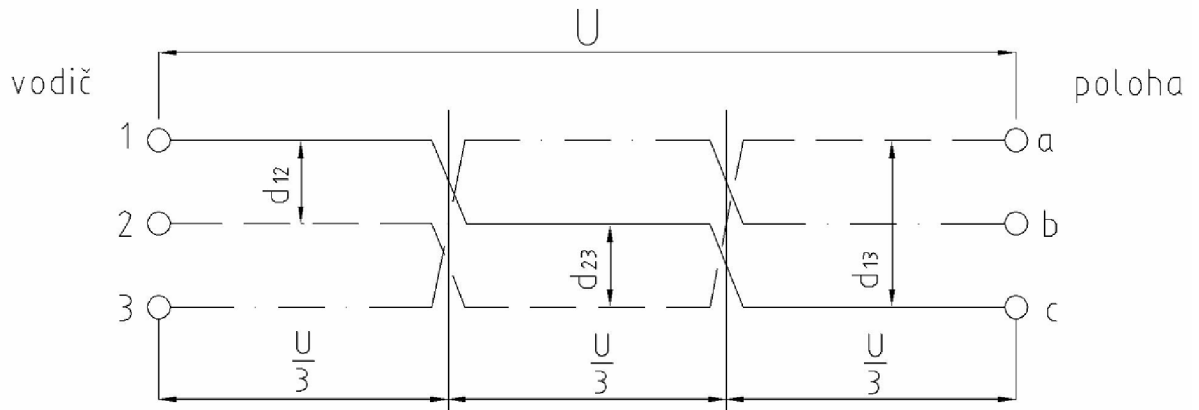
Tieto nežiadane vplyvy sa v trojfázovom vedení odstraňujú tzv. transpozíciou (krížením) vodičov v každom ich úseku. Princíp transpozície je znázornený na obr. 2-2.

Opäť uvažujeme rovnaké vodiče, tzn. rovnaký materiál a rovnaký prierez. Je viditeľné, že na úseku U (medzi dvoma odbermi) je každý vodič prestriedaný v $1/3$ tohto úseku hlavne stožiara tak, aby sa nachádzal v každej polohe a , b a c .

Prevádzková indukčnosť takéhoto transponovaného vedenia je

$$L_p = 0,46 \log \frac{\sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{13}}}{r} + 0,05 \cdot \mu_r \quad (mH / km), \quad (2.10)$$

je to vlastne stredná hodnota prevádzkových indukčností vodičov netransponovaného vedenia (2.9).



Obr. 2-2: Transpozícia vedenia

2.1.3 Kapacita

Každá dvojica elektród pri rozdielnom napätí umiestnená v nevodivom prostredí má schopnosť viazať na seba elektrický náboj [2]. Pre vedenie platí to isté, kde za elektródu považujeme vodič – zem. Kapacitou vlastne vyjadrujeme spätný vplyv elektrického poľa pôsobeného v priestore vedenia napätím medzi vodičmi na dané vedenie. Časovo premenné elektrické pole od napätia vo vodiči indukuje prúdy nie len v tomto vodiči ale aj v ostatných vodičoch.

K vyšetreniu kapacity sa používa statická definícia kapacity

$$C = \frac{Q}{U} \quad (F; C, V). \quad (2.11)$$

Predpokladá sa pole, ktoré sa mení iba so vzdialenosťou od osy vodiča (radiálne pole). Tento predpoklad je splnený, ak je vodič dostatočne dlhý, dielektrikum je homogénne a náboj je rozložený rovnomerne.

2.1.3.1 Kapacita trojfázového vedenia

U súmerného vedenia s napätím taktiež súmerným môžeme nahradiť vplyv elektrických polí susedných fáz v jednofázovom matematickom modeli prevádzkovou kapacitou. Prevádzková kapacita je viazaná matematickým vzťahom s kapacitou kondenzátora vodič - zem (kapacita proti zemi C_0) a vodič – vodič (kapacita vzájomná C_v) (viď obr. 2-3).

Pre súmerné trojfázové transponované vedenie je prevádzková kapacita

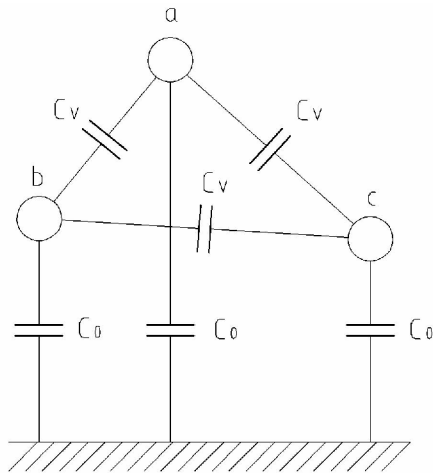
$$C_p = C_0 + 3C_v \quad (nF), \quad (2.12)$$

kde po úprave a vyčíslení rovnice (2.12) pre súmerné, plne transponované trojfázové vedenie dostaneme vzťah pre prevádzkovú kapacitu jedného vodiča

$$C_p = \frac{24,13}{\log \frac{d}{r}} \quad (nF). \quad (2.13)$$

Nesúmerné trojfázové vedenie plne transponované môžeme považovať za súmerné a preto platí

$$C_p = \frac{24,13}{\log \frac{\sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{23} \cdot d_{13}}}{r}} \quad (nF). \quad (2.14)$$



Obr. 2-3: Znáznornenie kapacít nesúmerného trojfázového transponovaného vedenia

Vyššie uvedené prevádzkové kapacity boli uvažované pre trojfázové vedenie bez zemného lana. U trojfázového vedenia so zemným lanom je prevádzková kapacita rovnaká ako u trojfázového vedenia bez zemného lana. Do úvahy však treba brať, že kapacita proti zemi C_0 sa zvýši, lebo sa vlastne "zem" zemným lanom k vodiču približuje. Na druhej strane sa zase vzájomná kapacita C_v použitím zemného lana znižuje.

2.1.4 Konduktancia (zvod)

Zvod predstavuje straty činného výkonu, ktoré sú spôsobené tzv. zvodovým prúdom. Tento zvodový prúd tečie za istých podmienok (znečistenie izolátoru, vlhkosť) z vodiča cez izolátor a stĺpy do zeme. Jeho veľkosť je závislá na izolačnom odpore [3]. Inými slovami povedané, zvod vzniká pri nedokonalosti izolácie vedenia proti zemi. Do zvodu sa započítavajú aj hodnoty predstavujúce straty korónou. Veľký vplyv na straty korónou má počasie.

Zvod je hodnota veľmi neurčitá. Pre vonkajšie vedenie 110kV sa jeho hodnota pohybuje približne od $4,3 \cdot 10^{-8}$ do $35 \cdot 10^{-8}$ S/km. Pri hrubých výpočtoch sa obvykle zvod zanedbáva.

2.1.5 Zväzkové vodiče

Zväzkový vodič pozostáva z viacerých mechanicky a elektricky paralelne zapojených jednoduchých lán (zvyčajne AlFe), umiestnených do rohov pravidelného viacuholníka, ktoré z montážneho hľadiska vytvárajú jednotný zväzok. Hlavným použitím zväzkových vodičov je zväčšenie prierezu. Ďalej zvyšujú kapacitu, znižujú indukčnosť a elektrické namáhanie na povrchu jednotlivých lán a tým teda aj straty korónou.

Rozloženie magnetického a elektrického poľa medzi zväzkovými vodičmi je iné než u jedného lana na fázu. Táto skutočnosť sa vyjadruje vo vzťahoch pre indukčnosť a kapacity vedenia fiktívnym polomerom r_e za celý zväzok, ktorý nazývame ekvivalentným v zmysle vplyvu na indukčnosť a kapacitu. Jeho hodnotu môžeme vypočítať podľa nasledovného vzťahu

$$r_e = \sqrt[3]{r \cdot a_{12} \cdot a_{13} \cdot \dots \cdot a_{1n}} \quad (cm), \quad (2.15)$$

kde n je počet lán vo zväzku, r je polomer lán vo zväzku a a_{1n} sú osové vzdialenosti medzi jedným z lán a ostatnými vo zväzku.

Zväzkové vodiče sa používajú najmä na vedenie vvn a zvn. Pre vedenie 110kV sa používajú iba výnimočne kvôli hospodárnosti, ich použitím sú drahšie stožiare, výstroj i montáž.

2.2 Stanovenie prevádzkových parametrov vedenia meraním

Pre stanovenie prevádzkových parametrov trojfázového vedenia pomocou merania musíme dodržať isté podmienky ako sú: dané vedenie musí byť transponované a zdroj musí dodávať súmerné harmonické napätie.

Meranie veličín sa vykonáva pri vedení v stave nakrátko a pri vedení v stave naprázdno. Z týchto dvoch meraní môžeme vypočítať prevádzkovú impedanciu nakrátko Z_{kk} a prevádzkovú admitanciu naprázdno Y_{00} podľa nasledovných vzťahov

$$\mathbf{Z}_{kk} = \frac{U_k}{I_k} \angle \alpha_{kk} \quad (\Omega; V, A, ^\circ), \quad (2.16)$$

$$\mathbf{Y}_{00} = \frac{I_0}{U_0} \angle \alpha_{00} \quad (S; V, A, ^\circ), \quad (2.17)$$

kde α_{kk} , α_{00} sú argumenty impedancie nakrátko a admitancie naprázdno,

U_k , I_k sú absolútne hodnoty fázorov napätia a prúdu obdržané pri meraní nakrátko,

U_0 , I_0 sú absolútne hodnoty fázorov napätia a prúdu obdržané pri meraní naprázdno.

Argumenty α_{kk} a α_{00} môžeme stanoviť jednoduchým spôsobom pomocou merania činného výkonu.

$$\alpha = \arccos \frac{P}{U \cdot I} \quad (^\circ; W, V, A). \quad (2.18)$$

V oboch prípadoch sú argumenty kladné. Impedancia nakrátko je indukčného charakteru a admitancia zase kapacitného charakteru.

Meranie nakrátko sa vykonáva pri skratovaných svorkách na konci vedenia. Vedenie je napájané takým zníženým napätím, aby vedením prechádzal menovitý prúd a prúdy v priečnom smere môžeme zanedbať. Za tohto predpokladu a pomocou vzťahu 2.1 približne platí

$$\mathbf{Z}_{kk} \cong \mathbf{z}_k \cdot l = (R_k + jX_k) \cdot l \quad (\Omega), \quad (2.19)$$

kde l je dĺžka vedenia.

Meranie naprázdno sa vykonáva pri rozpojených svorkách na konci vedenia. Vedenie je napájané menovitým napätím a prúd v pozdĺžnom smere je malý. Vplyv pozdĺžnej impedancie na admitanciu naprázdno sa zanedbáva. Za tohto predpokladu a pomocou vzťahu 2.2 približne platí

$$\mathbf{Y}_{00} \cong \mathbf{y}_k \cdot l = (G_k + jB_k) \cdot l \quad (S). \quad (2.20)$$

Je viditeľné, že pomocou výpočtu prevádzkovej impedancie nakrátko a prevádzkovej admitancie naprázdno je možné stanoviť približné hodnoty parametrov vedenia (R_k , X_k , G_k , B_k).

$$\left. \begin{aligned} R_k &= \frac{1}{l} \operatorname{Re}\{\mathbf{Z}_{kk}\} & X_k &= \frac{1}{l} \operatorname{Im}\{\mathbf{Z}_{kk}\} \\ G_k &= \frac{1}{l} \operatorname{Re}\{\mathbf{Y}_{00}\} & B_k &= \frac{1}{l} \operatorname{Im}\{\mathbf{Y}_{00}\} \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

3 ELEKTRICKÉ VEDENIA VVN V USTÁLENOM STAVE

Ustáleným stavom prenosových (distribučných v prípade u 110kV) vedení rozumieme také prevádzkové stavy, pri ktorých v zariadení neprebiehajú krátkodobé prechodné deje súvisiace s poruchami, s údermi blesku do vedenia alebo v jeho blízkosti, pripojovaním a odpojovaním vedenia, zdrojov, kompenzačných prostriedkov (kondenzátorov a tlmiviek), pripínaním odbočiek vinutí regulačných transformátorov za prevádzky a pod. Ustálený stav v sieti vlastne nenastáva vôbec. Príčinou je stála zmena počtu, zaťaženia spotrebiteľov a zaťaženia zdrojov. Avšak tieto zmeny sú pomalé a preto sa neberú do úvahy. Výpočet napätí a prúdov u všetkých prvkov danej siete v hraničných stavoch je základným výpočtom, pomocou ktorého kontrolujeme správnosť chodu a návrhu siete [1].

Spôsob výpočtu rozdelenia napätí a prúdov sa rozlišuje podľa menovitého napätia siete. Pre siete vvn môžeme zaviesť určité zjednodušenia pri riešení ustáleného chodu

1. Parametre vedenia sú konštanty nezávislé na prúde alebo napätí.
2. Napätie zdrojov a prúdy odberov sú harmonickými funkciami času s frekvenciou 50Hz.
3. Trojfázovú sieť uvažujeme súmernú v parametroch, spotrebičoch a zdrojoch. Vzájomné ovplyvňovanie medzi fázami je možné vyjadriť pomocou prevádzkových parametrov prvkov siete, prúdom a napätím jednej fázy.

Tieto zjednodušenia umožňujú riešiť trojfázovú sieť pomocou jednofázového matematického modelu, pri ktorom sa prevádzkové parametre uvažujú sústavou lineárnych komplexných rovníc. Tieto rovnice vyjadrujú vzťahy medzi prúdmi a napätiami v uzloch siete.

Parametre sú pozdĺž jednotlivých vedení rozložené homogénne. V dôsledku toho sa prúd aj napätie menia pozdĺž vedenia. Prenos energie striedavým prúdom súvisí so šírením elektromagnetických vln v priestore vedenia.

Úlohou trojfázových vedení vvn je prenos veľkého množstva elektrickej energie spravidla na veľké vzdialenosti. Dĺžky úsekov vedenia dosahujú často 100 km a prenášaný výkon v stovkách MW. Preto ich nazývame dlhé vedenia. U týchto vedení sa zameriame predovšetkým na stanovenie pomerov na jednom konci vedenia pri zadaných pomeroch na druhom konci vedenia. Tým získame podklady pre stanovenie strát činného výkonu a stanovenie účinnosti prenosu. Pri výpočtoch je treba brať do úvahy všetky parametre vedenia, t.j. činný odpor, indukčnosť, kapacitu a zvodový odpor.

V ďalších kapitolách sa budeme zaoberať presným, približným a grafickým riešením vedení vvn.

3.1 Presné riešenie

Táto metóda sa používa za predpokladu, že parametre sú rovnomerne rozložené pozdĺž vedenia. Metóda je vlastne riešením telegrafickej rovnice s uvažovaním základných veličín charakterizujúcich šírenie vln s harmonicky sa meniacimi napätiami a prúdmi.

Činiteľ šírenia vlny na jednotku dĺžky vedenia je daný vzťahom

$$\gamma_k = \sqrt{\mathbf{z}_k \cdot \mathbf{y}_k} = \sqrt{(R_k + j\omega L_k) + (G_k + j\omega C_k)} \quad (\text{km}^{-1}; \Omega \cdot \text{km}^{-1}, S \cdot \text{km}^{-1}). \quad (3.1)$$

Je to charakteristická veličina, ktorá predstavuje mieru šírenia v homogénnom vedení. Ako je zo vzťahu vidieť, činiteľ je závislý iba na parametroch vedenia, ktoré sú udávané na 1km dĺžky vedenia.

Ďalšou charakteristickou veličinou je vlnová, alebo tzv. charakteristická impedancia vedenia

$$\mathbf{Z}_v = \sqrt{\frac{\mathbf{z}_k}{\mathbf{y}_k}} = \sqrt{\frac{R_k + j\omega L_k}{G_k + j\omega C_k}} \quad (\Omega; \Omega \cdot km^{-1}, S \cdot km^{-1}). \quad (3.2)$$

Veličina udáva na každom mieste vedenia pomer napätia a prúdu, resp. odrazené vlny a je závislá taktiež iba na parametroch vedenia.

Ak poznáme pomery na konci vedenia, tak môžeme určiť pomery na začiatku vedenia vzťahmi

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_2 \cdot \frac{e^{\gamma_k l} + e^{-\gamma_k l}}{2} + \mathbf{I}_2 \cdot \mathbf{Z}_v \cdot \frac{e^{\gamma_k l} - e^{-\gamma_k l}}{2} \quad (V), \quad (3.3)$$

$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{U}_2}{\mathbf{Z}_v} \cdot \frac{e^{\gamma_k l} - e^{-\gamma_k l}}{2} + \mathbf{I}_2 \cdot \frac{e^{\gamma_k l} + e^{-\gamma_k l}}{2} \quad (A). \quad (3.4)$$

V prípade, že poznáme pomery na začiatku vedenia, tak pre pomery na konci vedenia platí

$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{U}_1 \cdot \frac{e^{\gamma_k l} + e^{-\gamma_k l}}{2} - \mathbf{I}_1 \cdot \mathbf{Z}_v \cdot \frac{e^{\gamma_k l} - e^{-\gamma_k l}}{2} \quad (V), \quad (3.5)$$

$$\mathbf{I}_2 = -\frac{\mathbf{U}_1}{\mathbf{Z}_v} \cdot \frac{e^{\gamma_k l} - e^{-\gamma_k l}}{2} + \mathbf{I}_1 \cdot \frac{e^{\gamma_k l} + e^{-\gamma_k l}}{2} \quad (A). \quad (3.6)$$

Pre výpočet napätia a prúdu je výhodnejší hyperbolický tvar rovníc. Pretože platí

$$\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \quad \text{a} \quad \cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}. \quad (3.7)$$

Ak dosadíme za $x = \gamma_k l$ do rovnice (3.7) a to potom do rovníc (3.3) až (3.6) dostaneme vzťahy

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_2 \cdot \cosh \gamma_k l + \mathbf{I}_2 \cdot \mathbf{Z}_v \cdot \sinh \gamma_k l \quad (V), \quad (3.8)$$

$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{U}_2}{\mathbf{Z}_v} \cdot \sinh \gamma_k l + \mathbf{I}_2 \cdot \cosh \gamma_k l \quad (A). \quad (3.9)$$

Obdobne pre pomery na konci vedenia

$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{U}_1 \cdot \cosh \gamma_k l - \mathbf{I}_1 \cdot \mathbf{Z}_v \cdot \sinh \gamma_k l \quad (V), \quad (3.10)$$

$$\mathbf{I}_2 = -\frac{\mathbf{U}_1}{\mathbf{Z}_v} \cdot \sinh \gamma_k l + \mathbf{I}_1 \cdot \cosh \gamma_k l \quad (A). \quad (3.11)$$

Hyperbolické funkcie komplexného argumentu sa určujú podľa zvláštnych tabuliek hyperbolických funkcií alebo z diagramu, avšak najvhodnejšie je rozvojom do nekonečnej rady. Pre hyperbolické funkcie rozvojom do nekonečnej rady platí

$$\left. \begin{aligned} \sinh x &= x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \dots \\ \cosh x &= 1 + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \dots \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

Ďalej vzťahy medzi napätím a prúdom na začiatku a na konci vedenia môžeme vyjadriť rovnicami súmerného, pasívneho a lineárneho štvorpólu v tvare

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{A} \cdot \mathbf{U}_2 + \mathbf{B} \cdot \mathbf{I}_2 \quad (V), \quad (3.13)$$

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{C} \cdot \mathbf{U}_2 + \mathbf{D} \cdot \mathbf{I}_2 \quad (A), \quad (3.14)$$

je to tzv. kaskádny tvar rovníc.

Obdobne pre fázory napätia a prúdu na konci vedenia

$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{A} \cdot \mathbf{U}_1 - \mathbf{B} \cdot \mathbf{I}_1 \quad (V), \quad (3.15)$$

$$\mathbf{I}_2 = -\mathbf{C} \cdot \mathbf{U}_1 + \mathbf{D} \cdot \mathbf{I}_1 \quad (A), \quad (3.16)$$

kde konštanty **A**, **B**, **C** a **D** nazývame Blondelové a sú viazané vzťahom

$$\mathbf{A}^2 - \mathbf{B} \cdot \mathbf{C} = 1. \quad (3.17)$$

Využitím vzťahov (3.12) pre Blondelové konštanty dostávame rovnice

$$\mathbf{A} = \cosh \gamma_k l = 1 + \frac{\mathbf{z}_k \cdot \mathbf{y}_k \cdot l^2}{2} + \frac{\mathbf{z}_k^2 \cdot \mathbf{y}_k^2 \cdot l^4}{24} + \dots \quad (-) \quad (3.18)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{Z}_v \cdot \sinh \gamma_k l = \mathbf{z}_k \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{z}_k \cdot \mathbf{y}_k \cdot l^2}{6} + \frac{\mathbf{z}_k^2 \cdot \mathbf{y}_k^2 \cdot l^4}{120} + \dots \right) \quad (\Omega) \quad (3.19)$$

$$\mathbf{C} = \frac{1}{\mathbf{Z}_v} \cdot \sinh \gamma_k l = \mathbf{y}_k \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{z}_k \cdot \mathbf{y}_k \cdot l^2}{6} + \frac{\mathbf{z}_k^2 \cdot \mathbf{y}_k^2 \cdot l^4}{120} + \dots \right) \quad (S) \quad (3.20)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{A} \quad (-) \quad (3.21)$$

Použitie súčtu dvoch až troch členov rady v predchádzajúcich vzťahoch obdržíme dostatočnú presnosť výpočtu.

Konštanty vyjadrené pomocou nekonečnej rady veľmi uľahčujú výpočet dlhých vedení. Ich použitím vieme stanoviť fázory napätia a prúdu na začiatku alebo konci vedenia bez toho, aby sme museli počítať ostatné komplexné konštanty (napr. vlnovú impedanciu a činiteľa šírenia).

Ďalšie potrebné veličiny napr. na začiatku vedenia stanovíme z trojfázového komplexného výkonu

$$\mathbf{S}_1 = 3 \cdot \mathbf{U}_{f1} \cdot \mathbf{I}_1^* \quad (VA; V, A), \quad (3.22)$$

$$\mathbf{S}_1 = P_1 \pm j \cdot Q_1 \quad (VA; W, VAR).$$

Účinník si vyjadříme pomocou trojuholníka výkonov, kde

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{Q_1}{P_1} \Rightarrow \cos \varphi_1 = \cos[\arctan(\operatorname{tg} \varphi_1)] \quad (-). \quad (3.23)$$

Straty činného výkonu

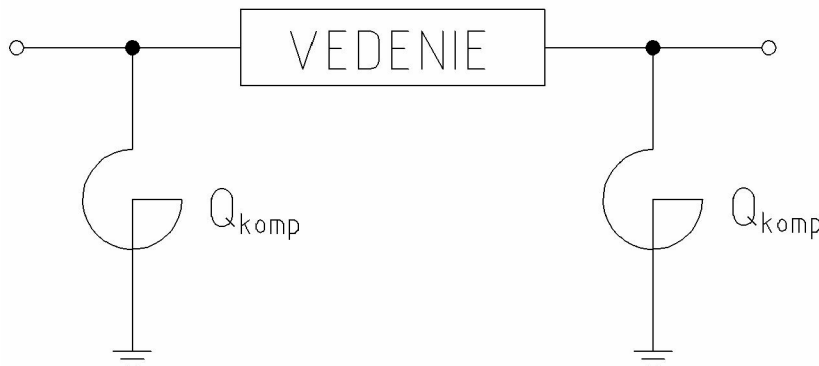
$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (W). \quad (3.24)$$

Účinnosť prenosu

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (\%). \quad (3.25)$$

3.1.1 Priečna kompenzácia

Ako už bolo povedané, dlhé vedenie má rovnomerne rozložené parametre pozdĺž svojej dĺžky. Hlavný parameter, ktorý spôsobuje ťažkosti s reguláciou napätia je kapacita. Ideálne by teda bolo, rovnomerné rozloženie priečných indukčností, kompenzujúcich vplyv kapacít. Nato sa používajú kompenzačné tlmivky, ktoré sa z technických dôvodov sústreďujú do významných miest vedenia (napr. koncové stanice) [4]. Príklad priečnej kompenzácie nám znázorňuje obr. 3-1.



Obr. 3-1: Priečna kompenzácia vedenia vvn

3.2 Približné riešenie

Pri približných metódach výpočtu dlhých vedení sa používajú náhradné články. Jedná sa o náhradné dvojbrány, pri ktorých parametre vedenia sú sústredené do určitej časti vedenia a zvod vedenia sa zvykne zanedbávať. V praxi sa najčastejšie stretávame s Π - článkom a T - článkom, ale existuje aj náhrada inými článkami ako napr. Γ - článok. Približné riešenie pomocou prvých dvoch článkov si ukážeme v nasledujúcich kapitolách.

3.2.1 T – článok

Tento článok je vytvorený tak, že pozdĺžna impedancia sa rozdelí na polovice a umiestni sa na začiatok a na koniec vedenia. Priečna admitancia sa umiestňuje do stredu vedenia. Znázornenie tohto článku nám ukazuje obr. 3-2.

Fázor napätia na začiatku vedenia určíme podľa vzťahu, ktorý nám vyplýva z obr. 3-2.

$$U_1 = U_2 + \Delta U_1 + \Delta U_2 \quad (V), \quad (3.26)$$

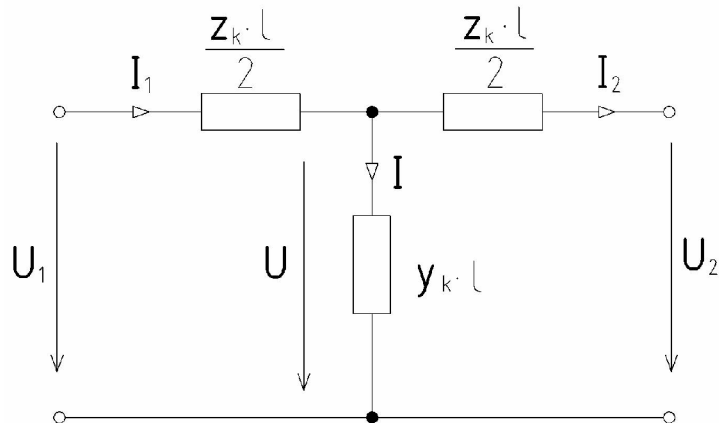
kde pre jednotlivé úbytky napätí platia vzťahy

$$\Delta U_1 = \frac{z_k \cdot l}{2} \cdot I_1 \quad (V; \Omega \cdot km^{-1}, m, A),$$

$$\Delta U_2 = \frac{z_k \cdot l}{2} \cdot I_2 \quad (V; \Omega \cdot km^{-1}, m, A). \quad (3.27)$$

Dosadením týchto vzťahov do rovnice (3.26) dostaneme

$$U_1 = U_2 + \frac{z_k \cdot l}{2} \cdot I_1 + \frac{z_k \cdot l}{2} \cdot I_2 \quad (V). \quad (3.28)$$



Obr. 3-2: T – článok

Fázor prúdu na začiatku vedenia

$$I_1 = I_2 + I \quad (A). \quad (3.29)$$

Fázor napätia na priečnej vetve

$$U = U_2 + \frac{z_k \cdot l}{2} \cdot I_2 \quad (V). \quad (3.30)$$

Prúd tečúci priečnou vetvou

$$I = y_k \cdot l \cdot U = y_k \cdot l \cdot U_2 + \frac{y_k \cdot z_k \cdot l^2}{2} \cdot I_2 \quad (A). \quad (3.31)$$

Dosadením tohto výrazu do vzťahu (3.29) a po úprave dostaneme

$$I_1 = y_k \cdot l \cdot U_2 + I_2 \cdot \left(1 + \frac{y_k \cdot z_k \cdot l^2}{2}\right) \quad (A). \quad (3.32)$$

Dosadením tejto rovnice do vzťahu (3.28) a po úprave pre fázor napätia dostaneme

$$U_1 = U_2 \cdot \left(1 + \frac{y_k \cdot z_k \cdot l^2}{2}\right) + I_2 \cdot z_k \cdot l \cdot \left(1 + \frac{y_k \cdot z_k \cdot l^2}{4}\right) \quad (V). \quad (3.33)$$

Porovnaním vzťahov (3.32) a (3.33) so vzťahmi (3.13), (3.14) obdržíme Blondelové konštanty

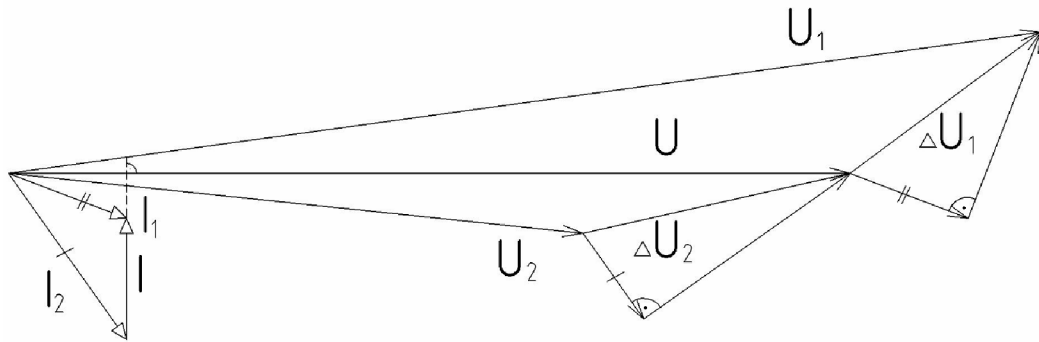
$$A_T = 1 + \frac{z_k \cdot y_k \cdot l^2}{2} \quad (-), \quad (3.34)$$

$$B_T = z_k \cdot l \cdot \left(1 + \frac{z_k \cdot y_k \cdot l^2}{4}\right) \quad (\Omega), \quad (3.35)$$

$$C_T = y_k \cdot l \quad (S), \quad (3.36)$$

$$D_T = A \quad (-). \quad (3.37)$$

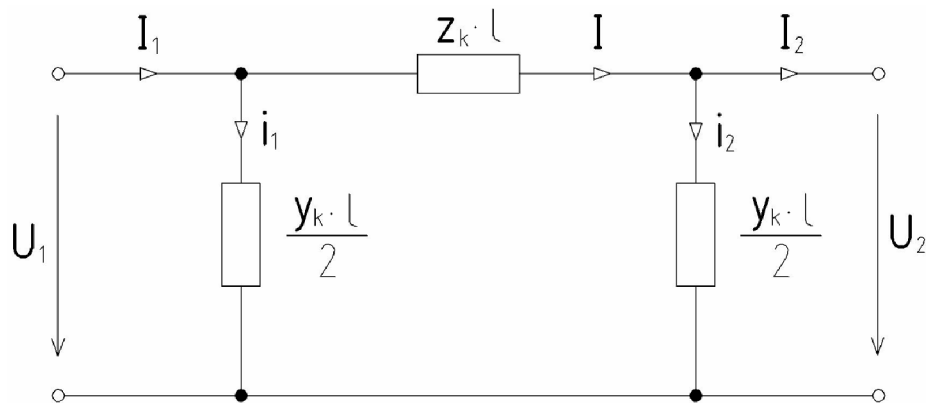
T – článok sa používa u vedení dlhých do 300 km.



Obr. 3-3: Fázorový diagram T – článku pri zanedbaní konduktancie

3.2.2 Π – článok

Náhradný článok je vytvorený tak, že pozdĺžna impedancia je sústredená do stredu vedenia. Pričná admitancia je rozdelená na dve polovice sústredené na začiatku a na konci vedenia. Znázornenie tohto článku nám ukazuje obr. 3-3.



Obr. 3-4: Π – článok

Z obrázku plynie

$$U_1 = U_2 + \Delta U_1 \quad (V), \quad (3.38)$$

kde pre úbytok na pozdĺžnu impedanciu vedenia platí

$$\Delta U_1 = z_k \cdot l \cdot I \quad (V; \Omega \cdot km^{-1}, m, A). \quad (3.39)$$

Fázor prúdu na začiatku vedenia

$$I_1 = i_1 + i_2 + I_2 \quad (A). \quad (3.40)$$

Pre prúdy tečúce v priečných vetvách platí

$$i_1 = U_1 \cdot \frac{y_k \cdot l}{2} \quad (A; V, S \cdot km^{-1}), \quad (3.41)$$

$$i_2 = U_2 \cdot \frac{y_k \cdot l}{2} \quad (A; V, S \cdot km^{-1}). \quad (3.42)$$

Dosadením prúdu I a vzťahu (3.39) do rovnice (3.38) po úprave dostaneme

$$U_1 = U_2 \cdot \left(1 + \frac{y_k \cdot z_k \cdot l^2}{2} \right) + I_2 \cdot z_k \cdot l \quad (V). \quad (3.43)$$

Dosadením vzťahov (3.41), (3.42) a využitím rovnice (3.43) po úpravách dostaneme

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{U}_2 \cdot \mathbf{y}_k \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{y}_k \cdot \mathbf{z}_k \cdot l^2}{4} \right) + \mathbf{I}_2 \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{y}_k \cdot \mathbf{z}_k \cdot l^2}{2} \right) \quad (\text{A}). \quad (3.44)$$

Obdobne ako u T – článku porovnaním posledných dvoch vzťahov so vzťahmi (3.13) a (3.14) obdržíme pre Blondelové konštanty výrazy

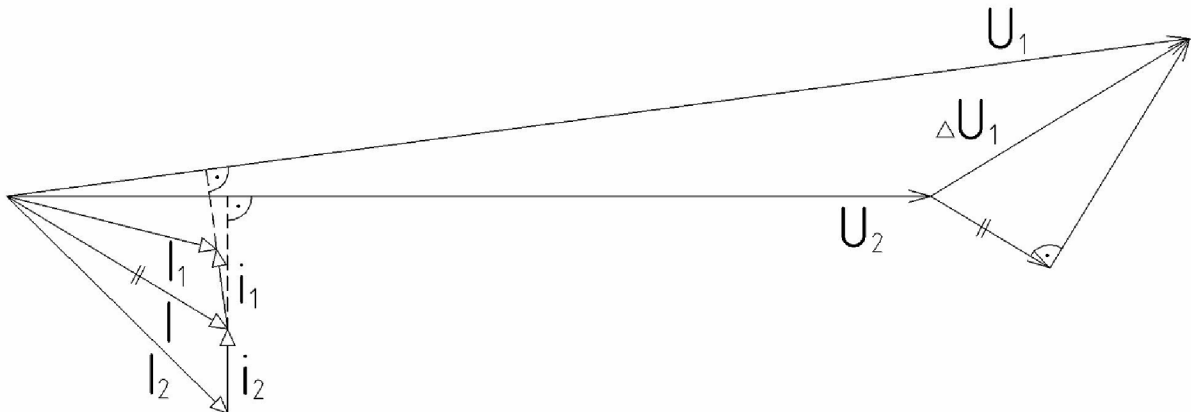
$$\mathbf{A}_\Pi = 1 + \frac{\mathbf{z}_k \cdot \mathbf{y}_k \cdot l^2}{2} \quad (-), \quad (3.45)$$

$$\mathbf{B}_\Pi = \mathbf{z}_k \cdot l \quad (\Omega), \quad (3.46)$$

$$\mathbf{C}_\Pi = \mathbf{y}_k \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{y}_k \cdot \mathbf{z}_k \cdot l^2}{4} \right) \quad (\text{S}), \quad (3.47)$$

$$\mathbf{D}_\Pi = \mathbf{A} \quad (-). \quad (3.48)$$

Aplikáciou T – článku a Π – článok pri riešení vedení vvn zistíme, že Π – článok dáva presnejšie výsledky ako T – článok a môže sa použiť do dĺžky vedenia 500km.



Obr. 3-5: Fázorový diagram Π – článku pri zanedbaní konduktancie

3.3 Vedenie pri chode naprázdno a nakrátko

Vzťahy pre vedenie pri chode naprázdno a nakrátko si odvodíme pomocou Π – článku zobrazeného na obr. 3-3. Pri riešení sa obvykle konduktancia zanedbáva ($G_k=0$) a priečna admitancia dvojbrány je potom reprezentovaná ideálnym kondenzátorom. Vzorce pri chode vedenia naprázdno sa dopĺňajú indexom „0“ a pri chode nakrátko s indexom „k“.

Pri chode naprázdno sa prúd pozdĺžnej vetvy \mathbf{I}_2 zanedbáva a dostávame nasledovné rovnice

$$\mathbf{U}_{10} = \mathbf{U}_{20} + \Delta\mathbf{U}_{10} \quad (\text{V}), \quad (3.49)$$

kde pre úbytok na pozdĺžnu impedanciu vedenia platí

$$\Delta\mathbf{U}_{10} = \mathbf{z}_k \cdot l \cdot \mathbf{I}_0 \quad (\text{V}; \Omega \cdot \text{km}^{-1}, \text{m}, \text{A}). \quad (3.50)$$

Fázor prúdu na začiatku vedenia

$$\mathbf{I}_{10} = \mathbf{i}_1 + \mathbf{I}_0 \quad (\text{A}). \quad (3.51)$$

Pre prúdy tečúce v priečných vetvách platí

$$\mathbf{i}_{10} = \mathbf{U}_{10} \cdot \frac{\mathbf{y}_k \cdot l}{2} \quad (A; V, S \cdot km^{-1}), \quad (3.52)$$

$$\mathbf{I}_0 = \mathbf{U}_{20} \cdot \frac{\mathbf{y}_k \cdot l}{2} \quad (A; V, S \cdot km^{-1}). \quad (3.53)$$

Dosadením prúdu \mathbf{I}_0 a vzťahu (3.50) do rovnice (3.49) po úprave dostaneme

$$\mathbf{U}_{10} = \mathbf{U}_{20} \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{y}_k \cdot \mathbf{z}_k \cdot l^2}{2} \right) \quad (V). \quad (3.54)$$

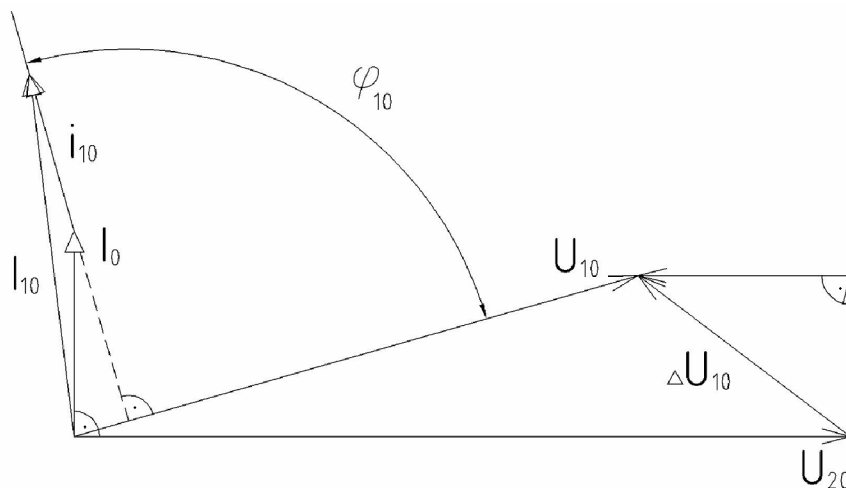
Dosadením vzťahov (3.52), (3.53) a využitím rovnice (3.54) po úpravách dostaneme

$$\mathbf{I}_{10} = \mathbf{U}_{20} \cdot \mathbf{y}_k \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{y}_k \cdot \mathbf{z}_k \cdot l^2}{4} \right) \quad (A). \quad (3.55)$$

S využitím Blondelových konštánt a vzťahov (3.54) a (3.55) určíme impedanciu vedenia naprázdno

$$\mathbf{Z}_{10} = \frac{\mathbf{U}_{10}}{\mathbf{I}_{10}} = \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{C}} \quad (\Omega). \quad (3.55)$$

S predchádzajúcich rovníc je zostrojený fázorový diagram zobrazený na obr. 3-4. Z obrázku je zrejmé, že impedancia naprázdno má kapacitný charakter, fázový posun medzi napätím a prúdom na začiatku vedenia sa blíži k 90° . Z obrázku je ďalej zrejmé, že $U_2 > U_1$. Táto skutočnosť (Ferrantihov jav) môže byť pri dostatočnej dĺžke vedenia príčinou ohrozenia izolácie pri náhlom odľahčení vedenia (odpojenie zaťaženia pri poruche), kedy napätie na začiatku ostane rovnaké ako pred odľahčením [1].



Obr. 3-6: Fázorový diagram Π – článku pri chode naprázdno

Pri chode nakrátko je napätie $U_2 = 0$ a platia nasledovné vzťahy

$$\mathbf{U}_{1k} = \Delta \mathbf{U}_{1k} \quad (V), \quad (3.56)$$

kde pre úbytok na pozdĺžnu impedanciu vedenia platí

$$\Delta \mathbf{U}_{1k} = \mathbf{z}_k \cdot l \cdot \mathbf{I}_{2k} \quad (V; \Omega \cdot km^{-1}, m, A). \quad (3.57)$$

Fázor prúdu na začiatku vedenia

$$\mathbf{I}_{1k} = \mathbf{i}_{1k} + \mathbf{I}_{2k} \quad (\text{A}) . \quad (3.58)$$

Pre prúd tečúci v priečnej vetve platí

$$\mathbf{i}_{1k} = \mathbf{U}_{1k} \cdot \frac{\mathbf{y}_k \cdot l}{2} \quad (\text{A}; \text{V}, \text{S} \cdot \text{km}^{-1}), \quad (3.59)$$

Dosadením vzťahu (3.57) do rovnice (3.56) dostaneme

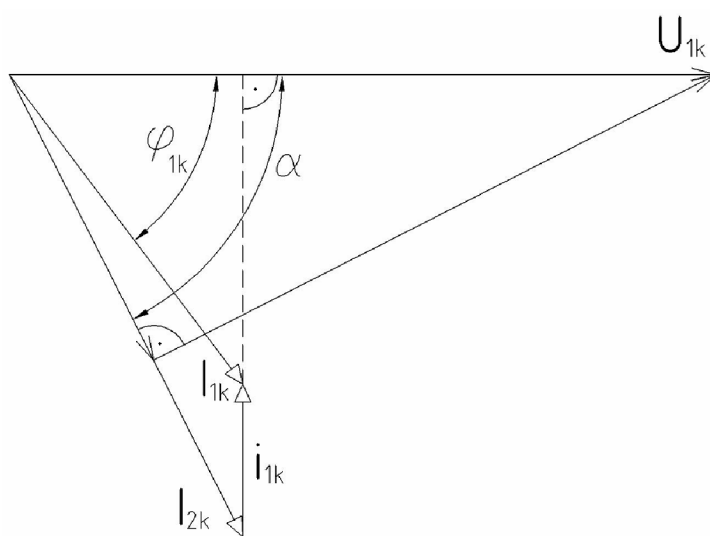
$$\mathbf{U}_{1k} = \mathbf{z}_k \cdot l \cdot \mathbf{I}_{2k} \quad (\text{V}) . \quad (3.60)$$

Dosadením vzťahu (3.59) a využitím rovnice (3.60) po úpravách dostaneme

$$\mathbf{I}_{1k} = \mathbf{I}_{2k} \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{y}_k \cdot \mathbf{z}_k \cdot l^2}{2} \right) \quad (\text{A}) . \quad (3.61)$$

S využitím Blondelových konštánt a vzťahov (3.60) a (3.61) určíme impedanciu vedenia nakrátko

$$\mathbf{Z}_{1k} = \frac{\mathbf{U}_{1k}}{\mathbf{I}_{1k}} = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{A}} \quad (\Omega) . \quad (3.62)$$



Fázorový diagram predošlých vzťahov zobrazuje obr. 3-5. Z obrázku je vidieť, že impedancia nakrátko je induktívneho charakteru, fazový posun medzi napätím a prúdom na začiatku vedenia je záporný. Jeho veľkosť sa blíži hodnote uhla vedenia α ($\text{tg } \alpha = X_k/R_k$).

Obr. 3-7: Fázorový diagram II – článku pri chode nakrátko

3.4 Grafické riešenie

Grafickou metódou je vhodné riešiť rôzne prevádzkové stavy na jednom vedení. Týchto grafických metód je niekoľko a líšia sa od zadaných vstupných hodnôt, zjednodušení a pod. Jednou z týchto metód je superpozícia stavu naprázdno a nakrátko. Postup je taký, že ak poznáme pomery na konci vedenia (napr. fázory napätia a prúdu), tak napätie je na začiatku vedenia rovné vektorovému súčtu dvoch napätí. Jedno je napätie naprázdno na začiatku vedenia a druhé je napätie na začiatku vedenia pri chode nakrátko. Rovnako to platí aj pre prúd na začiatku vedenia, ktorý je daný vektorovým súčtom prúdu na začiatku vedenia pri chode naprázdno a prúdu na začiatku vedenia pri chode nakrátko.

Medzi najpoužívanejšie metódy patria Blondel – Thielmansova a Fallouova metóda, ktoré sa dajú použiť pri dĺžke vedenia do 300km.

4 RIEŠENIE ZADANÉHO PRÍKLADU

Na konci trojfázového vedenia s menovitým napätím $U_n = 110$ kV, dĺžky 150 km so zadanými parametrami je odoberaný činný výkon 20 MW, účinník odberu je 0,8 indukčného charakteru a napätie $U_2 = U_n = 110$ kV. Parametre uvažovaného vedenia: $R_k = 0,21 \Omega/\text{km}$, $X_k = 0,416 \Omega/\text{km}$, $G_k = 0,04 \cdot 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$, $B_k = 2,74 \cdot 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$. Vhodnou metódou určite:

a) pomery na začiatku vedenia,

b) pomery na vedení pri chode naprázdno a nakrátko, ak uvažujeme v oboch prípadoch na začiatku vedenia $U_1 = U_n = 110$ kV.

V nasledujúcich postupoch riešenia príkladu budeme vedenie nahradzovať jednofázovými modelmi, preto musíme pri výpočtoch uvažovať fázovú hodnotu napätia.

4.1 Výpočet s presným riešením

Podľa vzťahu (2.1) si vypočítame pozdĺžnu impedanciu na 1 km dĺžky

$$\mathbf{z}_k = R_k + jX_k = (0,21 + j0,416) \Omega / \text{km}.$$

Priečna admitancia na 1 km dĺžky (2.2)

$$\mathbf{y}_k = G_k + jB_k = (0,04 \cdot 10^{-6} + j2,74 \cdot 10^{-6}) \text{ S} / \text{km}.$$

Fázová hodnota menovitého napätia na konci vedenia

$$U_{2f} = \frac{U_{2S}}{\sqrt{3}} = \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 63508,53 \text{ V}.$$

Fázor prúdu na konci vedenia

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_2 &= \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{2S}} - j \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U_{2S}} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{2S}} - j \frac{\text{tg} \varphi \cdot P}{\sqrt{3} \cdot U_{2S}} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} - \\ &- j \frac{\text{tg}(\arccos 0,8) \cdot 20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} = (104,973 - j78,73) \text{ A}. \end{aligned}$$

Riešenie budeme vykonávať pomocou kaskádneho tvaru rovníc, z ktorých si najprv vyčíslime jednotlivé Blondelové konštanty podľa vzťahov (3.18) až (3.21)

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= 1 + \frac{\mathbf{z}_k \cdot \mathbf{y}_k \cdot l^2}{2} + \frac{\mathbf{z}_k^2 \cdot \mathbf{y}_k^2 \cdot l^4}{24} = 1 + \frac{(0,21 + j0,416) \cdot (0,04 \cdot 10^{-6} + j2,74 \cdot 10^{-6}) \cdot 150^2}{2} + \\ &+ \frac{(0,21 + j0,416)^2 \cdot (0,04 \cdot 10^{-6} + j2,74 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 150^4}{24} = 0,987 + j6,632 \cdot 10^{-3}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mathbf{z}_k \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{z}_k \cdot \mathbf{y}_k \cdot l^2}{6} + \frac{\mathbf{z}_k^2 \cdot \mathbf{y}_k^2 \cdot l^4}{120} \right) = (0,21 + j0,416) \cdot 150 \cdot \\ &\cdot \left(1 + \frac{(0,21 + j0,416) \cdot (0,04 \cdot 10^{-6} + j2,74 \cdot 10^{-6}) \cdot 150^2}{6} + \right. \\ &\left. + \frac{(0,21 + j0,416)^2 \cdot (0,04 \cdot 10^{-6} + j2,74 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 150^4}{120} \right) = (31,228 + j62,205) \Omega, \end{aligned}$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{y}_k \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{z}_k \cdot \mathbf{y}_k \cdot l^2}{6} + \frac{\mathbf{z}_k^2 \cdot \mathbf{y}_k^2 \cdot l^4}{120} \right) = (0,04 \cdot 10^{-6} + j2,74 \cdot 10^{-6}) \cdot 150 \cdot \left(1 + \frac{(0,21 + j0,416) \cdot (0,04 \cdot 10^{-6} + j2,74 \cdot 10^{-6}) \cdot 150^2}{6} + \frac{(0,21 + j0,416)^2 \cdot (0,04 \cdot 10^{-6} + j2,74 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 150^4}{120} \right) = (5,064 + j409,271) \cdot 10^{-6} \text{ S} ,$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{A} = 0,987 + j6,632 \cdot 10^{-3} .$$

Vypočítané Blondelové konštanty dosadíme do rovníc (3.13), (3.14) a určíme fázor napätia a prúdu na začiatku vedenia

$$\mathbf{U}_{1f} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{U}_{2f} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{I}_2 = (0,987 + j6,632 \cdot 10^{-3}) \cdot 63508,53 + (31,228 + j62,205) \cdot (104,973 - j78,73) = 70858,42 + j4492,45 = \underline{\underline{(71000,69 \angle 3,628^\circ) \text{ V} ,}}$$

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{C} \cdot \mathbf{U}_{2f} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{I}_2 = (5,064 + j409,271) \cdot 10^{-6} \cdot 63508,53 + (0,987 + j6,632 \cdot 10^{-3}) \cdot (104,973 - j78,73) = 104,452 - j51,018 = \underline{\underline{(116,246 \angle -26,032^\circ) \text{ A} .}}$$

Združenú hodnotu napätia na začiatku vedenia určíme podľa nasledovného vzťahu

$$\mathbf{U}_{1S} = \sqrt{3} \cdot |\mathbf{U}_{f1}| \angle \delta_{U1f} + 30^\circ = \sqrt{3} \cdot 71000,69 \angle 3,628^\circ + 30^\circ = \underline{\underline{(122976,8 \angle 33,628^\circ) \text{ V} ,}}$$

kde δ_{U1f} je argument fázového napätia na začiatku vedenia.

Pri známych pomeroch na začiatku vedenia môžeme určiť trojfázový komplexný výkon (3.21)

$$\mathbf{S}_1 = 3 \cdot \mathbf{U}_{f1} \cdot \mathbf{I}_1^* = 3 \cdot (70858,42 + j4492,45) \cdot (104,452 + j51,018) = \underline{\underline{(21,516 + j12,253) \text{ MVA} .}}$$

Z komplexného výkonu vieme ďalej určiť činný a jalový výkon na začiatku vedenia

$$P_1 = \text{Re}\{\mathbf{S}_1\} = 21,516 \text{ MW} ,$$

$$Q_1 = \text{Im}\{\mathbf{S}_1\} = 12,253 \text{ MVA}r .$$

Účinník prenosu na začiatku vedenia

$$\cos \varphi_1 = \cos \left[\arctan \left(\frac{Q_1}{P_1} \right) \right] = \cos \left[\arctan \left(\frac{12,253}{21,516} \right) \right] = 0,8690 .$$

Účinnosť prenosu podľa vzorca (3.25)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{20}{21,516} \cdot 100 = 92,954 \% .$$

Straty činného výkonu (3.24)

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 21,516 - 20 = 1,516 \text{ MW} .$$

4.2 Výpočet pomocou Π - článku

Pozdĺžna impedancia na 1 km dĺžky

$$\mathbf{z}_k = R_k + jX_k = (0,21 + j0,416) \Omega / km .$$

Priečna admitancia na 1 km dĺžky

$$\mathbf{y}_k = G_k + jB_k = (0,04 \cdot 10^{-6} + j2,74 \cdot 10^{-6}) S / km .$$

Fázová hodnota menovitého napätia na konci vedenia

$$\mathbf{U}_{2f} = \frac{\mathbf{U}_{2S}}{\sqrt{3}} = \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 63508,53 V .$$

Fázor prúdu na konci vedenia

$$\mathbf{I}_2 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_{2S}} - j \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_{2S}} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} - j \frac{\text{tg}(\arccos 0,8) \cdot 20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} = (104,973 - j78,73) A$$

Obdobne využijeme Blondelové konštanty podľa vzťahov (3.45) až (3.48)

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{\Pi} &= 1 + \frac{\mathbf{z}_k \cdot \mathbf{y}_k \cdot l^2}{2} = 1 + \frac{(0,21 + j0,416) \cdot (0,04 \cdot 10^{-6} + j2,74 \cdot 10^{-6}) \cdot 150^2}{2} = \\ &= 0,987 + j6,66 \cdot 10^{-3} , \end{aligned}$$

$$\mathbf{B}_{\Pi} = \mathbf{z}_k \cdot l = (0,21 + j0,416) \cdot 150 = (31,5 + j62,4) \Omega ,$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{\Pi} &= \mathbf{y}_k \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{z}_k \cdot \mathbf{y}_k \cdot l^2}{4} \right) = (0,04 \cdot 10^{-6} + j2,74 \cdot 10^{-6}) \cdot 150 \cdot \\ &\cdot \left(1 + \frac{(0,210 + j0,416) \cdot (0,04 \cdot 10^{-6} + j2,74 \cdot 10^{-6}) \cdot 150^2}{4} \right) = (4,593 + j408,4) \cdot 10^{-6} S , \end{aligned}$$

$$\mathbf{D}_{\Pi} = \mathbf{A}_{\Pi} = 0,987 + j6,66 \cdot 10^{-3} .$$

Fázor napätia a prúdu na začiatku vedenia podľa (3.13) a (3.14)

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{1f} &= \mathbf{A}_{\Pi} \cdot \mathbf{U}_{2f} + \mathbf{B}_{\Pi} \cdot \mathbf{I}_2 = (0,987 + j6,66 \cdot 10^{-3}) \cdot 63508,53 + (31,5 + j62,4) \cdot \\ &\cdot (104,973 - j78,73) = 70902,32 + j4493,29 = \underline{\underline{(71044,55 \angle 3,626^\circ)}} V , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_1 &= \mathbf{C}_{\Pi} \cdot \mathbf{U}_{2f} + \mathbf{D}_{\Pi} \cdot \mathbf{I}_2 = (4,593 + j408,4) \cdot 10^{-6} \cdot 63508,53 + (0,987 + j6,66 \cdot 10^{-3}) \cdot \\ &\cdot (104,973 - j78,73) = 104,424 - j51,07 = \underline{\underline{(116,243 \angle -26,062^\circ)}} A . \end{aligned}$$

Združenú hodnotu napätia na začiatku vedenia určíme podľa nasledovného vzťahu

$$\mathbf{U}_{1S} = \sqrt{3} \cdot |\mathbf{U}_{f1}| \angle \delta_{U_{1f}} + 30^\circ = \sqrt{3} \cdot 71044,55 \angle 3,626^\circ + 30^\circ = \underline{\underline{(123052,77 \angle 33,626^\circ)}} V ,$$

Fázor komplexného výkonu (3.21)

$$\mathbf{S}_1 = 3 \cdot \mathbf{U}_{f1} \cdot \mathbf{I}_1^* = 3 \cdot (70902,32 + j4493,29) \cdot (104,424 + j51,07) = \underline{\underline{(21,523 + j12,270) MVA}} .$$

Činný a jalový výkon na začiatku vedenia

$$P_1 = \operatorname{Re}\{\mathbf{S}_1\} = 21,523 \text{ MW} ,$$

$$Q_1 = \operatorname{Im}\{\mathbf{S}_1\} = 12,270 \text{ MVar} .$$

Účinník prenosu na začiatku vedenia

$$\cos \varphi_1 = \cos \left[\arctan \left(\frac{Q_1}{P_1} \right) \right] = \cos \left[\arctan \left(\frac{12,270}{21,523} \right) \right] = 0,8687 .$$

Účinnosť prenosu podľa vzorca (3.25)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{20}{21,523} \cdot 100 = 92,924 \% .$$

Straty činného výkonu (3.24)

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 21,523 - 20 = 1,523 \text{ MW} .$$

4.3 Výpočet pomocou T - článku

Pozdĺžna impedancia na 1 km dĺžky

$$\mathbf{z}_k = R_k + jX_k = (0,21 + j0,416) \Omega / km .$$

Priečna admitancia na 1 km dĺžky

$$\mathbf{y}_k = G_k + jB_k = (0,04 \cdot 10^{-6} + j2,74 \cdot 10^{-6}) S / km .$$

Fázová hodnota menovitého napätia na konci vedenia

$$U_{2f} = \frac{U_{2S}}{\sqrt{3}} = \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 63508,53 \text{ V} .$$

Fázor prúdu na konci vedenia

$$\mathbf{I}_2 = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{2S}} - j \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U_{2S}} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} - j \frac{\operatorname{tg}(\arccos 0,8) \cdot 20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 110 \cdot 10^3} = (104,973 - j78,73) \text{ A}$$

Opäť využijeme Blondelové konštanty podľa vzťahov (3.34) až (3.37)

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_T &= 1 + \frac{\mathbf{z}_k \cdot \mathbf{y}_k \cdot l^2}{2} = 1 + \frac{(0,21 + j0,416) \cdot (0,04 \cdot 10^{-6} + j2,74 \cdot 10^{-6}) \cdot 150^2}{2} = \\ &= 0,987 + j6,66 \cdot 10^{-3} , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_T &= \mathbf{z}_k \cdot l \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{z}_k \cdot \mathbf{y}_k \cdot l^2}{4} \right) = (0,21 + j0,416) \cdot 150 \cdot \\ &\cdot \left(1 + \frac{(0,21 + j0,416) \cdot (0,04 \cdot 10^{-6} + j2,74 \cdot 10^{-6}) \cdot 150^2}{4} \right) = (31,092 + j62,108) \Omega , \end{aligned}$$

$$\mathbf{C}_T = \mathbf{y}_k \cdot l = (0,04 \cdot 10^{-6} + j2,74 \cdot 10^{-6}) \cdot 150 = (6 + j411) \cdot 10^{-6} \text{ S} ,$$

$$\mathbf{D}_T = \mathbf{A} = 0,987 + j6,66 \cdot 10^{-3}.$$

Fázor napätia a prúdu na začiatku vedenia

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{1f} &= \mathbf{A}_T \cdot \mathbf{U}_{2f} + \mathbf{B}_T \cdot \mathbf{I}_2 = (0,987 + j6,66 \cdot 10^{-3}) \cdot 63508,53 + (31,092 + j62,108) \cdot \\ &\cdot (104,973 - j78,73) = 70836,5 + j4494,757 = \underline{\underline{(70978,96 \angle 3,631^\circ) V}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_1 &= \mathbf{C}_T \cdot \mathbf{U}_{2f} + \mathbf{D}_T \cdot \mathbf{I}_2 = (6 + j411) \cdot 10^{-6} \cdot 63508,53 + (0,987 + j6,66 \cdot 10^{-3}) \cdot \\ &\cdot (104,973 - j78,73) = 104,514 - j50,905 = \underline{\underline{(116,252 \angle -25,969^\circ) A}}. \end{aligned}$$

Združenú hodnotu napätia na začiatku vedenia určíme podľa nasledovného vzťahu

$$\mathbf{U}_{1S} = \sqrt{3} \cdot |\mathbf{U}_{f1}| \angle \delta_{U_{1f}} + 30^\circ = \sqrt{3} \cdot 70978,96 \angle 3,63^\circ + 30^\circ = \underline{\underline{(122939,17 \angle 33,631^\circ) V}},$$

Fázor komplexného výkonu (3.21)

$$\mathbf{S}_1 = 3 \cdot \mathbf{U}_{f1} \cdot \mathbf{I}_1^* = 3 \cdot (70836,5 + j4494,757) \cdot (104,514 + j50,905) = \underline{\underline{(21,524 + j12,227) MVA}}.$$

Činný a jalový výkon na začiatku vedenia

$$P_1 = \operatorname{Re}\{\mathbf{S}_1\} = 21,524 \text{ MW},$$

$$Q_1 = \operatorname{Im}\{\mathbf{S}_1\} = 12,227 \text{ MVA}r.$$

Účinník prenosu na začiatku vedenia

$$\cos \varphi_1 = \cos \left[\arctan \left(\frac{Q_1}{P_1} \right) \right] = \cos \left[\arctan \left(\frac{12,227}{21,524} \right) \right] = 0,8695.$$

Účinnosť prenosu podľa vzorca (3.25)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{20}{21,524} \cdot 100 = 92,92 \text{ \%}.$$

Straty činného výkonu

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 21,524 - 20 = 1,524 \text{ MW}.$$

4.4 Pomery na vedení pri chode naprázdno a nakrátko

a) pomery pri chode naprázdno

Pri chode naprázdno je vedenie na začiatku napájané menovitým napätím 110 kV a prúd v pozdĺžnom smere \mathbf{I}_2 sa zanedbáva. Postup riešenia bude obdobný ako postup uvedený v kapitole 3.3.

Fázová hodnota menovitého napätia na začiatku vedenia pri chode naprázdno

$$\mathbf{U}_{10f} = \frac{\mathbf{U}_{10S}}{\sqrt{3}} = \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 63508,53 \text{ V}.$$

Pre napätie na konci vedenia podľa vzorca (3.54) platí

$$\begin{aligned} U_{10f} &= \mathbf{A}_{\Pi} \cdot \mathbf{U}_{20f} \Rightarrow \mathbf{U}_{20f} = \frac{\mathbf{U}_{10f}}{\mathbf{A}_{\Pi}} = \frac{63508,53}{(0,987 + j6,66 \cdot 10^{-3})} = 64342,09 - j434,162 = \\ &= \underline{\underline{(64343,55 \angle -0,387^\circ) V}}. \end{aligned}$$

Obdobne pre prúd naprázdno podľa (3.55)

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{10} &= \mathbf{C}_{\Pi} \cdot \mathbf{U}_{20f} = (4,593 + j408,4) \cdot 10^{-6} \cdot (64342,09 - j434,162) = 0,4728 + j26,275 = \\ &= (26,279 \angle 88,969^\circ) A. \end{aligned}$$

Zdužené napätie naprázdno na konci vedenia

$$\mathbf{U}_{20S} = \sqrt{3} \cdot |\mathbf{U}_{20f}| \angle \delta_{U_{10f}} + 30^\circ = \sqrt{3} \cdot 64343,55 \angle -0,387^\circ + 30^\circ = \underline{\underline{(111446,3 \angle 29,613^\circ) V}}.$$

Komplexný výkon naprázdno na začiatku vedenia

$$\mathbf{S}_{10} = 3 \cdot \mathbf{U}_{10f} \cdot \mathbf{I}_{10}^* = 3 \cdot 63508,53 \cdot (0,4728 - j26,275) = \underline{\underline{(90,08 - j5006,06) kVA}}.$$

Straty pri chode naprázdno

$$P_{10} = \operatorname{Re}\{\mathbf{S}_{10}\} = 90,08 \text{ kW}.$$

Impedancia vedenia naprázdno

$$\mathbf{Z}_{10} = \frac{\mathbf{U}_{10}}{\mathbf{I}_{10}} = \frac{63508,53}{0,4728 + j26,275} = 43,479 - j2416,29 = \underline{\underline{(2416,68 \angle -88,969^\circ) \Omega}}.$$

Účinník prenosu na začiatku vedenia pri chode naprázdno

$$\cos \varphi_{10} = \cos \left[\arctan \left(\frac{Q_{10}}{P_{10}} \right) \right] = \cos \left[\arctan \left(\frac{5006,06}{90,08} \right) \right] = 0,018.$$

b) pomery pri chode nakrátko

Pri chode nakrátko je vedenie opäť napájané na začiatku napätím 110 kV a napätie $U_2 = 0$. Postupovať budeme rovnako ako v kapitole 3.3.

Fázová hodnota menovitého napätia na začiatku vedenia pri chode naprázdno

$$\mathbf{U}_{1kf} = \frac{\mathbf{U}_{1kS}}{\sqrt{3}} = \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 63508,53 \text{ V}.$$

Prúd nakrátko na konci vedenia

$$\mathbf{U}_{1kf} = \mathbf{B}_{\Pi} \cdot \mathbf{I}_{2k} \Rightarrow \mathbf{I}_{2k} = \frac{\mathbf{U}_{1kf}}{\mathbf{B}_{\Pi}} = \frac{63508,53}{31,5 + j62,4} = 409,438 - j811,077 = \underline{\underline{(908,562 \angle -63,215^\circ) V}}$$

Prúd nakrátko na začiatku vedenia

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{1k} &= \mathbf{A}_{\Pi} \cdot \mathbf{I}_{2k} = (0,987 + j6,66 \cdot 10^{-3}) \cdot (409,438 - j811,077) = 409,517 - j797,806 = \\ &= \underline{\underline{(896,771 \angle -62,828^\circ) A}}. \end{aligned}$$

Komplexný výkon nakrátko

$$\mathbf{S}_{1k} = 3 \cdot \mathbf{U}_{1kf} \cdot \mathbf{I}_{1k}^* = 3 \cdot 63508,53 \cdot (409,517 + j797,806) = \underline{\underline{(78,023 + j152,002) \text{ MVA}}}.$$

Straty pri chode nakrátko

$$P_{1k} = \operatorname{Re}\{\mathbf{S}_{1k}\} = 78,023 \text{ MW}.$$

Impedancia vedenia nakrátko

$$\mathbf{Z}_{1k} = \frac{\mathbf{U}_{1k}}{\mathbf{I}_{1k}} = \frac{63508,53}{409,517 - j797,806} = 32,34 + j63,004 = \underline{\underline{(70,819 \angle 62,829^\circ) \Omega}}.$$

Účinník prenosu na začiatku vedenia pri chode nakrátko

$$\cos \varphi_{1k} = \cos \left[\arctan \left(\frac{Q_{1k}}{P_{1k}} \right) \right] = \cos \left[\arctan \left(\frac{152,002}{78,023} \right) \right] = 0,4567.$$

5 ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV

Kompletný prehľad dosiahnutých výsledkov pri určení pomerov na začiatku vedenia jednotlivými metódami nám zobrazuje tab. 5-1 a tab. 5-2.

Tab. 5-1: Výsledky združeného napätia, prúdu a komplexného výkonu na začiatku vedenia

Metóda riešenia	U_{1S}	I_1	S_1
	[V]	[A]	[MVA]
presné riešenie	122976,8∠33,628°	116,246∠-26,032°	21,516 + j12,253
Π - článok	123052,77∠33,626°	116,243∠-26,062°	21,523 + j12,270
T - článok	122939,17∠33,631°	116,252∠-25,969°	21,524 + j12,227

Tab. 5-2: Výsledky účinníka na začiatku vedenia, účinnosti a strát činného výkonu

Metóda riešenia	$\cos\varphi_1$	η	ΔP
	[-]	[%]	[MW]
presné riešenie	0,8690	92,954	1,516
Π - článok	0,8687	92,924	1,523
T - článok	0,8695	92,92	1,524

V tab. 5-1 sme komplexný výkon uviedli v algebraickom tvare, aby sme vedeli porovnať činný a jalový výkon. Na základe porovnania je zrejmé, že presné riešenie vykazuje najlepšiu účinnosť prenosu z uvedených metód (92,954 %). Následkom dobrej účinnosti sú straty činného výkonu na vedení menšie. Pre lepšie porovnanie výsledkov je zostrojená tab. 5-3, ktorá obsahuje absolútne relatívne výchylky veličín približného riešenia od presného riešenia (referenčného).

Tab. 5-3: Absolútne relatívne výchylky výsledných hodnôt približného riešenia od presného

Metódy riešenia	$\delta U_{1S} $	$\delta I_1 $	$\delta S_1 $	$\delta \cos\varphi_1 $	$\delta \eta $
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Π - článok	0,0618	$2,58 \cdot 10^{-3}$	0,0606	0,0345	0,0323
T - článok	0,0306	$5,16 \cdot 10^{-3}$	0,0242	0,0575	0,0366

Rozdiely veličín približného riešenia od presného sú veľmi malé, avšak pri väčšej dĺžke vedenia by sme sa mohli dopracovať k značným nepresnostiam. Napr. T - článok je použiteľný do dĺžky vedenia 300 km a Π - článok do 500 km dĺžky vedenia. Rovnako aj pri presnom riešení pri väčších dĺžkach vedenia je vhodné použiť súčet viac členov nekonečného radu vo vzorcoch (3.18) - (3.21).

Výsledné pomery vedenia pri chode naprázdno a nakrátko zobrazuje tab. 5-3.

Tab. 5-4: Výsledky pomerov vedenia pri chode naprázdno a nakrátko

Chod naprázdno			Chod nakrátko		
U_{20S}	[V]	$111446,3 \angle 29,613^\circ$	I_{2k}	[V]	$908,562 \angle -63,215^\circ$
I_{10}	[A]	$26,279 \angle 88,969^\circ$	I_{1k}	[A]	$896,771 \angle -62,828^\circ$
S_{10}	[kVA]	$90,08 - j5006,06$	S_{1k}	[MVA]	$78,023 + j152,002$
Z_{10}	[Ω]	$2416,68 \angle -88,969^\circ$	Z_{1k}	[Ω]	$70,819 \angle 62,829^\circ$
$\cos\varphi_{10}$	[-]	0,018	$\cos\varphi_{1k}$	[-]	0,4567

Pri chode vedenia naprázdno je z tab. 5-3 viditeľné, že napätie na konci vedenia pri tomto chode je väčšie než napätie na začiatku vedenia. To je spôsobené tzv. Ferranteho javom, ktorý sme si spomenuli v kapitole 3.3. Jedná sa o formu prevádzkového prepätia a niekedy sa vyskytuje aj pri málo zaťažených vvn vedeniach. Pri chode nakrátko prúd na konci vedenia dosahuje približne sedemnásobok prúdu na konci vedenia pri zaťažení podľa zadania. Vplyvom takéhoto prúdu môže dôjsť k značnému zahrievaniu vodičov vedenia.

LITERATÚRA

- [1] BLAŽEK V., SKALA P.: *Distribuce elektrické energi*, VUT v Brně
- [2] MATOUŠEK, A.; BLAŽEK, V. *Elektroenergetika*. Praha: SNTL, 1982, 152 s.
- [3] KUČERA D.: *Elektroenergetika I*, Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1986, 214 s.
- [4] FEJT, Z.; ČERMÁK, J. *Elektroenergetika*. Praha: ČVUT v Praze, 1981, 359 s.
- [5] HORÁK K.: *Výpočet elektrických sítí*, Praha: STNL, 1980
- [6] HODINKA, M., et al. *Přenos a rozvod elektrické energie: Příklady*. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1988, 240 s.
- [7] *Tzb-info.cz* [online]. 26. 5. 2010, [cit. 2010-05-26]. TZB-info - stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov. Dostupné z <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=4192>.