

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 220 KV

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

PAVEL HOBZA

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Pavel Hobza

ID: 125144

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Ustálený chod vedení 220 kV

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Stanovení poměrů na vedení při přenosu přirozeného výkonu.
2. Stanovení poměrů na vedení při chodu naprázdno.
3. Stanovení poměrů na vedení při chodu nakrátko.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

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

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

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 citace práce:

HOBZA, P. *Ustálený chod vedení 220 kV*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 41 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Jako autor uvedené diplomové (bakalářské) práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové (bakalářské) práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

USTÁLENÝ CHOD VEDENÍ 220 KV

Pavel Hobza

vedoucí: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2013

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor's Thesis

STABILIZED OPERATION OF THE 220 KV POWER LINE

by

Pavel Hobza

Supervisor: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Brno University of Technology, 2013

Brno

ABSTRAKT

Tato práce pojednává o metodách řešení vedení v napěťových hladinách velmi vysokého napětí a zvláště vysokého napětí. V první, teoretické části práce jsou rozebrány různé metody řešení těchto vedení. Jedná se především o přesné řešení, které modelujeme pomocí vedení s rovnoměrně rozloženými parametry a přibližným řešením, jež modelujeme pomocí vedení se soustředěnými parametry. Dále jsou zde probrány zvláštní případy ustáleného chodu vedení a to chod vedení naprázdno, nakrátko a chod vedení s přirozeným výkonem. V závěru teoretické části je uvedena obecná metoda řešení sítí velmi vysokého a zvláště vysokého napětí a také jsou zde uvedeny některé grafické metody řešení těchto sítí a jejich stručný popis.

Ve druhé, praktické části jsou výše uvedené metody řešení aplikovány na konkrétní vedení s danými parametry a za pomoci nich je provedeno řešení poměrů na vedení v ustáleném chodu a při zvláštních případech chodu vedení. V závěru práce jsou shrnuty získané výsledky.

KLÍČOVÁ SLOVA: admitance; chod nakrátko; chod naprázdno; chod s přirozeným výkonem; impedance; iterační metoda; napětí; proud; přenos výkonu; ustálený chod vedení; účinník; vedení; výkon

ABSTRACT

This thesis deals with methods of solving lines under voltage levels of very high transmission voltage and extra high voltage. The first, theoretical part of this paper analyses different methods how such lines are solved. In particular, an accurate solution is provided simulated by means of a line with evenly distributed parameters, and an approximate solution simulated by means of a line with lumped parameters. Furthermore, special cases of steady running conditions of the line are reviewed, such as no-load running, short-circuit and line operation with natural load. In conclusion of the theoretical part is given a general method of solving an extra-high-tension and extra high voltage network; also, some graphical methods of solving such networks are shown including their brief description.

The second, practical part of the present paper involves application of the above mentioned methods of solution on a specific line with given parameters, solving conditions at the power line under steady running conditions and in special cases of the line operation. The conclusion of the thesis summarizes the obtained results.

KEY WORDS: admittance; current; electric power; freewheeling; impedance; iterative method; operation with natural power; power factor; power line; power transmission; short-circuit operation; stable operations of power lines; voltage;

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD	13
2 CÍLE PRÁCE	14
3 PŘESNÉ ŘEŠENÍ USTÁLENÉHO CHODU VEDENÍ VVN A ZVN	14
3.1 VÝKONOVĚ NAPĚŤOVÉ ROVNICE PRO TROJFÁZOVÉ SOUMĚRNÉ VEDENÍ	20
4 PŘIBLIŽNÉ ŘEŠENÍ USTÁLENÉHO CHODU VEDENÍ VVN	21
4.1 METODA NÁHRADNÍCH ČLÁNKŮ	21
4.2 II-DVOJBRAN	22
5 OBECNÁ METODA ŘEŠENÍ USTÁLENÉHO CHODU	24
6 ZVLÁŠTNÍ PŘÍPADY USTÁLENÉHO CHODU	27
6.1 CHOD VEDENÍ NAKRÁTKO	27
6.2 CHOD NAPRÁZDNO	28
6.3 CHOD S PŘIROZENÝM VÝKONEM	29
7 GRAFICKÉ METODY VÝPOČTU.....	31
8 USTÁLENÝ CHOD VEDENÍ- PŘESNÝ VÝPOČET	32
8.1 STANOVENÍ POMĚRŮ NA VEDENÍ PŘI PŘENOSU PŘIROZENÉHO VÝKONU	33
8.2 STANOVENÍ POMĚRŮ NA VEDENÍ PŘI CHODU NAPRÁZDNO	34
8.3 STANOVENÍ POMĚRŮ NA VEDENÍ PŘI CHODU NAKRÁTKO	34
9 ZÁVĚRY PRÁCE A JEJÍ PŘÍNOS.....	36
9.1 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY A JEJICH ZHODNOCENÍ	36
POUŽITÁ LITERATURA	41

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3-1 Vedení s rovnoměrně rozloženými parametry</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 3-2 Element vedení s rovnoměrně rozloženými parametry.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 4-1 Π-článek.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 4-2 Fázorový diagram Π-článku (zanedbáváme konduktanci).....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 5-1 Síť trojúhelníkového tvaru</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 5-2 Náhradní schéma sítě trojúhelníkového tvaru.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 6-1 Fázorový diagram Π-článku při chodu nakrátko.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 6-2 Fázorový diagram Π-článku při chodu naprázdno</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 8-1 Účinnost při přenosu přirozeného výkonu</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 8-2 Průběh napětí při chodu nakrátko</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 8-3 Průběh proudu při chodu nakrátko</i>	<i>39</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 8-1</i>	<i>hodnoty na vedení při přenosu přirozeného výkonu.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 8-2</i>	<i>hodnoty na vedení při chodu naprázdno.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 8-3</i>	<i>hodnoty na vedení při chodu naprázdno.....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 8-4</i>	<i>hodnoty na vedení při chodu nakrátko.....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 8-5</i>	<i>hodnoty na vedení při chodu nakrátko.....</i>	<i>37</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotka
$\hat{R}_1$	integrační konstanta	—
$\hat{R}_2$	integrační konstanta	—
$\hat{A}$	blondelova konstanta	—
$\hat{B}$	blondelova konstanta	Ω
$\hat{B}_k$	měrná příčná kapacitní susceptance	$S \cdot km^{-1}$
$\hat{C}$	blondelova konstanta	S
C_k	měrná kapacita	$F \cdot km^{-1}$
G_k	měrná vodivost	$S \cdot km^{-1}$
I	proud	A
$\hat{I}$	vektor proudu	A
L_k	měrná indukčnost	$H \cdot km^{-1}$
P	činný výkon	W
Q	jalový výkon	VA_r
R	odpor	Ω
Re	reálná část	—
Im	imaginární část	—
R_k	měrný odpor	$\Omega \cdot km^{-1}$
$\hat{S}$	zdánlivý výkon (vektor)	VA
U_n	Jmenovité napětí	V
$\hat{U}$	vektor napětí	V
$\hat{U}_f$	fázor fázového napětí	V
$\hat{U}_1$	fázor napětí na začátku vedení	V
$\hat{U}_S$	fázor sdruženého napětí	V
X_k	měrná podélná induktivní reaktance	$\Omega \cdot km^{-1}$
$\hat{Y}$	admittance (vektor)	S
$\hat{Z}$	impedance	Ω
$\hat{Z}_V$	vlnová impedance	Ω
$\hat{Z}_k$	měrná podélná impedance	Ω
θ	fáze napětí, proudu, impedance, admittance s příslušným indexem	$^\circ$
$\cos\varphi$	účinník	—

dx	element délky	m
e	eulerovo číslo	—
f	kmitočet	Hz
i	okamžitá hodnota proudu	A
j	imaginární jednotka	—
l	délka vedení	km
t	čas	s
u	okamžitá hodnota napětí	V
x	vzdálenost na vedení	m
ΔP	ztráty činného výkonu	W
ΔU	úbytek napětí	V
α	reálná část činitele šíření, činitel tlumení	km^{-1}
β	imaginární část činitele šíření, činitel fázového natočení	km^{-1}
γ	činitel šíření	km^{-1}
π	Ludolfovo číslo	—
φ	fáze	rad
ω	úhlová rychlost	$rad \cdot s^{-1}$
∂	znak parciální derivace	—
ξ	verzorový úhel vlnové impedance	$^{\circ}$
$_1$	index veličina na začátku vedení	—
$_2$	index veličina na konci vedení	—
$_0$	index veličina naprázdno	—
$_k$	index veličina nakrátko	—
$_p$	index veličina při přenosu přirozeného výkonu	—
$1km$	index měrná jednotka na 1km	—
$*$	index veličina komplexně združená	—

1 ÚVOD

Vedení 400 kV spolu s vedením 220 kV tvoří přenosovou soustavu v České republice. Používají se k přenosu vysokých výkonů, řádově stovky MW, na značné vzdálenosti, k propojení a spolupráci s elektrizačními soustavami sousedních států. V ČR přenosovou soustavu ze zákona provozuje akciová společnost ČEPS (Česká energetická přenosová soustava). Přenosovou soustavu ČEPS, a.s., tvoří 41 rozvodných zařízení a až 71 transformátorů s úhrnným výkonem 19 980 MVA, dále 3008 km tras vedení 400 kV a 1349 km tras vedení 220 kV. Do přenosové soustavy patří i jedna rozvodna 123 kV a 45 km tras vedení 110 kV [3]. Tato vedení pracují v napětových hladinách VVN a ZVN. Je to z důvodu omezení tzv. Joulových ztrát (ztrát činného výkonu), které jsou závislé na odporu vodiče a vzrůstají se čtvercem proudu, ztráty pak rostou přímo úměrně s velikostí odporu a čtvercem proudu.

$$P = \sqrt{3}U_s \cdot I \cdot \cos\varphi = 3 \cdot U_f \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (1.1)$$

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad (1.2)$$

Je zřejmé, že při stejném přenášeném výkonu je výhodné použít nejvyššího možného napětí. V některých zemích, je využíváno pro přenos elektrické energie napětí až 750 kV. Jako například v Rusku nebo v Kanadě, kde tento hlavní rozvod propojuje západní části země s východním pobřežím.

V našich podmínkách hustě osídleného území není využití tohoto napětí pro prostorovou náročnost realizovatelné. Z důvodu použití tak vysokého napětí a celkové rozlehlosti těchto sítí není jejich řešení jednoduché. Nelze již přijímat taková zjednodušení jako u sítí nn a vn. U těchto vedení musíme počítat i s proudy v příčném směru přenosu (konduktancí a kapacitami vodičů), jelikož jejich velikosti jsou řádově srovnatelné s proudy odběrů a mají tedy podstatný vliv na úbytky napětí a ztráty výkonu.

Pro výpočet proudů v odběrových uzlech z výkonů nelze použít jmenovité napětí nebo napětí stejné pro všechny uzly, protože mezi fázory napětí v jednotlivých uzlech vedení jsou velké rozdíly jak v absolutní hodnotě, tak i ve fázovém posunu. Tyto proudy jsou potom v řešeních neznámými.

Při řešení těchto vedení přijímáme tato zjednodušení:

- a) parametry vedení případně transformátorů a ostatních prvků jsou konstanty nezávislé na proudu nebo napětí
- b) napětí zdrojů a proudy odběrů jsou harmonickými funkcemi času s frekvencí 50 Hz
- c) u trojfázových soustav předpokládáme symetrii prvků v parametrech a u odběrů a zdrojů v proudech a napětích.

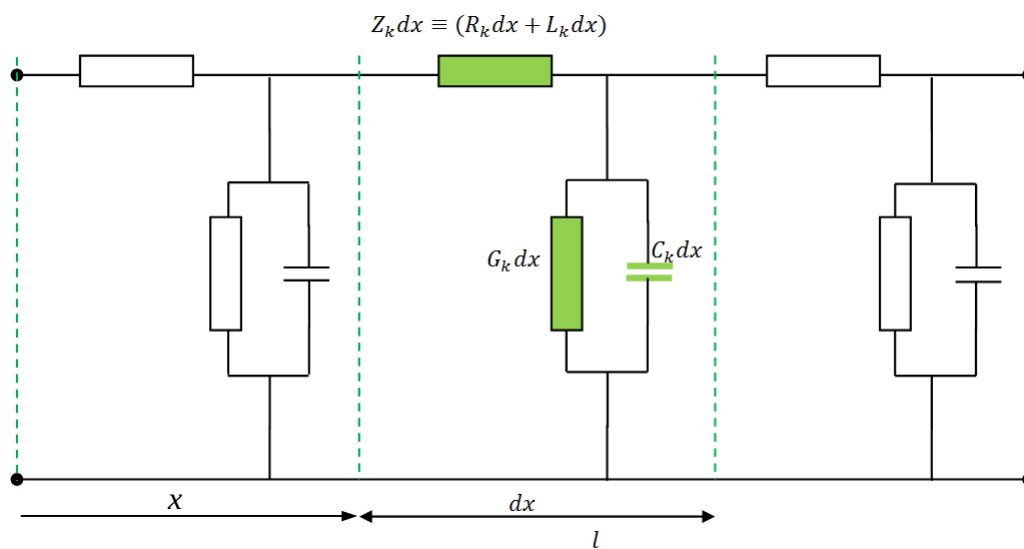
Při řešení ustáleného chodu těchto sítí považujeme vedení za homogenní, to znamená, že parametry vedení jsou podél vedení rozloženy rovnoměrně, proto se napětí i proud mění podél vedení. Vlnové procesy se v ustáleném chodu u vedení ZVN a VVN neuvažují, neboť délky vedení jsou malé vůči délce vlny napětí a proudu a velké vůči vzdálenosti vodičů. V dalších částech se budeme zabývat metodami řešení poměrů v síti, jednak přesným řešením a také přibližným řešením pomocí náhradních obvodů se soustředěnými parametry. Fázy budeme označovat tučným písmem anebo, ve vztazích a rovnicích, stříškou.

2 CÍLE PRÁCE

V prvních kapitolách provedeme teoretický rozbor vybraných metod řešení vedení VVN a ZVN. V práci se budeme zabývat konkrétně vedením s rovnoměrně rozloženými parametry a vedením se soustředěnými parametry. Dále se zmíníme o zvláštních případech chodu vedení, a to o chodu vedení naprázdno, nakrátko a chodu s přirozeným výkonem. Za další se v práci zmíníme o metodě řešení uzlových sítí a v závěru teoretické části uvedeme stručný přehled vybraných grafických metod řešení vedení VVN a ZVN. Ve druhé části práce budeme aplikovat teoretické poznatky z první části práce na konkrétním vedení o daných parametrech. Konkrétně stanovení poměrů na vedení 220 kV při přenosu přirozeného výkonu, při chodu naprázdno a při chodu nakrátko. V závěru pak zhodnotíme získané výsledky a porovnáme jednotlivé zvláštní případy chodu vedení.

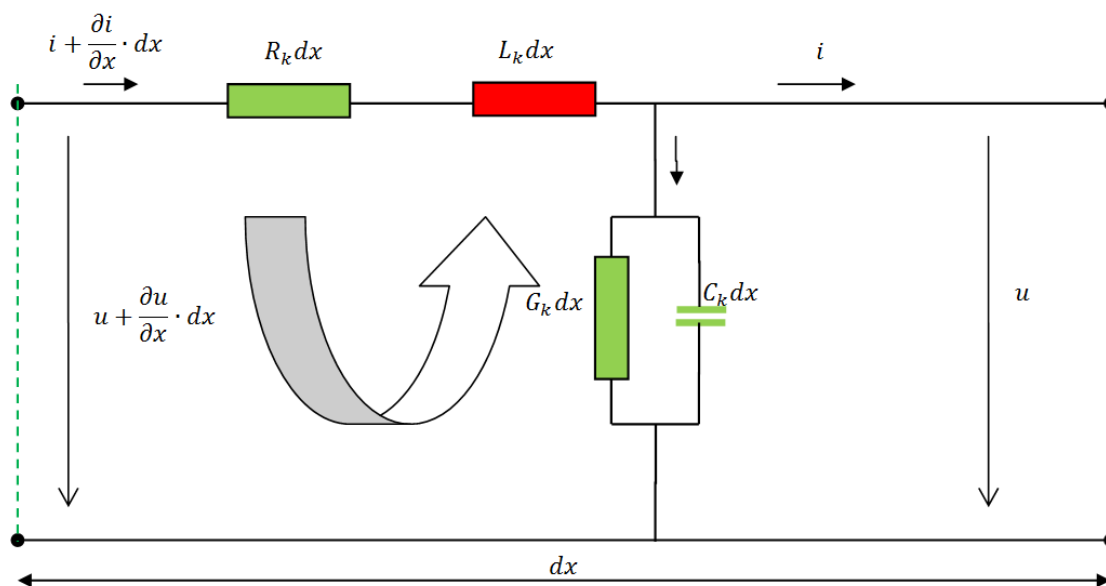
3 PŘESNÉ ŘEŠENÍ USTÁLENÉHO CHODU VEDENÍ VVN A ZVN

V této kapitole budeme uvažovat vedení s rovnoměrně rozloženými parametry, které je napájené symetrickým zdrojem napětí a je zatěžováno symetrickou zátěží. V náhradním schématu máme nekonečný počet pasivních čtyřpólů o elementární délce dx obr. 3-1.



Obr. 3-1 Vedení s rovnoměrně rozloženými parametry

Pro jeden element homogenního vedení délky dx , vzdálený x od začátku vedení který znázorňuje obr. 3-2., platí, že na začátku vedení je proud $i(x)$ a napětí $u(x)$. Na konci vedení ve vzdálenosti $(x + dx)$ je proud $i(x + dx)$ a napětí $u(x + dx)$ [2]



Obr. 3-2 Element vedení s rovnoměrně rozloženými parametry

Pro tento element dále platí:

- Okamžité hodnoty proudu i a napětí u jsou závislé na čase t a v uvažovaném bodě x
- Parametry vedení jsou součinem jednotkové hodnoty příslušného parametru a délkového elementu dx . Podle Kirchhofových zákonů pro element vedení délky dx platí vztahy:

$$u + \frac{\partial u}{\partial x} - u = R_k \cdot i \cdot dx + L_k \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \cdot dx \quad (3.1)$$

$$i + \frac{\partial i}{\partial x} - i = G_k \cdot u \cdot dx + C_k \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \cdot dx \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = R_k \cdot i + L_k \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = G_k \cdot u + C_k \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.4)$$

Dále separujeme funkce u a i z rovnic (3.3), (3.4) a obě rovnice derivujeme podle x :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = R_k \cdot \frac{\partial i}{\partial x} + L_k \cdot \frac{\partial^2 i}{\partial t \cdot \partial x} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = G_k \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + C_k \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t \cdot \partial x} \quad (3.6)$$

Dále derivujeme vztahy (3.3), (3.4) podle t :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x \cdot \partial t} = R_k \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + L_k \cdot \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x \cdot \partial t} = G_k \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + C_k \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.8)$$

Dosadíme do rovnic (3.5) a (3.6). Za smíšené derivace dosadíme z (3.7), (3.8) a za derivace podle x z (3.3) a (3.4), další matematickou úpravou dostaneme vztahy:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = G_k \cdot R_k \cdot u + (G_k \cdot L_k + R_k \cdot C_k) \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + C_k \cdot L_k \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = G_k \cdot R_k \cdot i + (G_k \cdot L_k + R_k \cdot C_k) \cdot \frac{\partial i}{\partial t} + C_k \cdot L_k \cdot \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (3.10)$$

Předchozí dvě rovnice jsou lineární parciální diferenciální rovnice druhého řádu, které odvodil roku 1855 Thomson při výpočtu podmořských telegrafních kabelů. Z tohoto důvodu se nazývají **telegrafní rovnice**. Obecné řešení těchto rovnic umožňuje stanovit časovou závislost napětí a proudu v kterémkoli bodě x pro libovolný časový průběh napětí a proudu na konci vedení $u_2(t)$ a $i_2(t)$. [2] My řešíme vedení v ustáleném stavu, po odeznění přechodných jevů, proto můžeme psát následující vztahy:

$$\begin{aligned} i &= \sqrt{2} \cdot I(x) \cdot \sin(\omega t + \varphi) \\ \frac{\partial i}{\partial t} &= \sqrt{2} \cdot \omega \cdot I(x) \cdot \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \\ \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} &= \sqrt{2} \cdot \omega^2 \cdot I(x) \cdot \sin(\omega t + \varphi + \pi) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Použitím symbolicko-komplexního počtu pro zápis rovnic (3.11) upravíme na:

$$\begin{aligned} i &= \operatorname{Re}\{\sqrt{2} \cdot I(x) \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}\} = \operatorname{Re}\{\sqrt{2} \cdot \hat{I}(x) \cdot e^{j\omega t}\} \\ \frac{\partial i}{\partial t} &= \operatorname{Re}\{\sqrt{2} \cdot j\omega I(x) \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}\} = \operatorname{Re}\{\sqrt{2} \cdot j\omega \hat{I}(x) \cdot e^{j\omega t}\} \\ \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} &= \operatorname{Re}\{-\sqrt{2} \cdot \omega^2 I(x) \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}\} = \operatorname{Re}\{-\sqrt{2} \cdot \omega^2 \hat{I}(x) \cdot e^{j\omega t}\} \end{aligned} \quad (3.12)$$

V předchozím vztahu platí, že: $\hat{I}(x) = I(x) \cdot e^{j\varphi}$. Telegrafní rovnice přepíšeme do symbolicko-komplexního tvaru.

Pro efektivní hodnoty proudu platí:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \hat{I}(x)}{\partial x^2} &= G_k R_k \hat{I}(x) + (G_k L_k + R_k C_k) j\omega \hat{I}(x) - C_k L_k \omega^2 \cdot \hat{I}(x) = \\ &= (R_k + jX_k) \cdot (G_k + jB_k) \cdot \hat{I}(x) = \hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k \cdot \hat{I}(x) \end{aligned} \quad (3.13)$$

kde X_k je podélná induktivní reaktance na jednotku délky vedení a B_k je příčná kapacitní susceptance na jednotku délky vedení pro harmonickou změnu napětí a proudu s úhlovou frekvencí $\omega = 2\pi f$

Analogicky, pro druhou derivaci napětí, platí:

$$\frac{\partial^2 \hat{U}(x)}{\partial x^2} = \hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k \cdot \hat{U}(x) \quad (3.14)$$

Charakteristická rovnice k (3.13) a (3.14) má tvar:

$$\gamma^2 - \hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k = 0 \quad (3.15)$$

Její kořeny potom jsou:

$$\gamma_{1,2} = \pm \sqrt{\hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k} = \alpha + j \cdot \beta \quad (3.16)$$

γ se nazývá činitel šíření, obecně je to komplexní veličina. Reálná část α je konstanta útlumu a určuje míru změny amplitudy proudu a napětí na jednotku délky vedení. Imaginární část β nazýváme fázová konstanta a určuje úhlové natočení proudu a napětí na jednotku délky vedení[1].

Dále píšeme obecné řešení diferenciálních rovnic (3.13) a (3.14):

$$\begin{aligned} \hat{I}(x) &= \hat{K}_1 \cdot \hat{Y}_v \cdot e^{-\gamma x} - \hat{K}_2 \cdot \hat{Y}_v \cdot e^{\gamma x} \\ \hat{U}(x) &= \hat{K}_1 \cdot e^{-\gamma x} + \hat{K}_2 \cdot e^{\gamma x} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Integrační konstanty $\hat{K}_1$ a $\hat{K}_2$ určíme pomocí okrajových podmínek proudu a napětí.

Pro vedení délky l [$x \in < 0; l >$] máme zadány buď hodnoty na začátku, nebo na konci vedení. ($x = 0$) nebo ($x = l$). Takže pro každý případ můžeme vyjádřit konstanty $\hat{K}_1, \hat{K}_2$ a z výše uvedených rovnic (3.17) vyjádřit neznámé pro oba případy [1].

pokud je zadáno napětí a proud na začátku vedení, $\hat{I}_1, \hat{U}_1$ hledáme:

$$\begin{aligned} \hat{I}(x) &= f(\hat{I}_1, \hat{U}_1) \\ \hat{U}(x) &= f(\hat{I}_1, \hat{U}_1) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Do rovnic (3.17) dosadíme $x = 0$ a můžeme psát:

$$\begin{aligned} \hat{I}_1 &= \hat{K}_1 \cdot \hat{Y}_v - \hat{K}_2 \cdot \hat{Y}_v &>> \hat{K}_2 &= \frac{\hat{U}_1 - \hat{Z}_v \cdot \hat{I}_1}{2} \\ \hat{U}_1 &= \hat{K}_1 + \hat{K}_2 &>> \hat{K}_1 &= \frac{\hat{U}_1 + \hat{Z}_v \cdot \hat{I}_1}{2} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Po dosazení do (3.17) a s použitím jedné z matematických definic pro hyperbolické funkce:

$$\cosh \gamma x = \frac{(e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})}{2} \quad \sinh \gamma x = \frac{(e^{\gamma x} - e^{-\gamma x})}{2} \quad (3.20)$$

Dostaneme:

$$\begin{aligned} \hat{I}(x) &= -\hat{U}_1 \cdot \hat{Y}_v \sinh \gamma x + \hat{I}_1 \cdot \cosh \gamma x & \hat{I}(x) &= -\hat{C}(x) \cdot \hat{U}_1 + \hat{A}(x) \cdot \hat{I}_1 \\ \hat{U}(x) &= \hat{U}_1 \cdot \cosh \gamma x - \hat{I}_1 \cdot \hat{Z}_v \sinh \gamma x & \hat{U}(x) &= \hat{D}(x) \cdot \hat{U}_1 - \hat{B}(x) \cdot \hat{I}_1 \end{aligned} \quad (3.21)$$

Komplexní konstanty $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}$ nazýváme přenosové nebo Blondelovy konstanty, jsou závislé na parametrech vedení [1].

Platí:

$$\hat{A} \cdot \hat{D} - \hat{B} \cdot \hat{C} = 1 \quad (3.22)$$

pokud je zadáno napětí a proud na konci vedení, $\hat{I}_2, \hat{U}_2$ hledáme:

$$\begin{aligned} \hat{I}(x) &= f(\hat{I}_2, \hat{U}_2) \\ \hat{U}(x) &= f(\hat{I}_2, \hat{U}_2) \end{aligned} \quad (3.23)$$

Do rovnic (3.17) dosadíme $x = l$ a můžeme psát:

$$\begin{aligned} \hat{I}_2 &= \hat{K}_1 \cdot e^{-\gamma x} \cdot \hat{Y}_v - \hat{K}_2 \cdot e^{\gamma x} \cdot \hat{Y}_v & \gg & \hat{K}_2 = \frac{(\hat{U}_2 - \hat{Z}_v \cdot \hat{I}_2) \cdot e^{-\gamma x}}{2} \\ \hat{U}_2 &= \hat{K}_1 \cdot e^{-\gamma x} + \hat{K}_2 \cdot e^{\gamma x} & \gg & \hat{K}_1 = \frac{(\hat{U}_2 + \hat{Z}_v \cdot \hat{I}_2) \cdot e^{\gamma x}}{2} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Pro napětí a proud v libovolném místě vedení můžeme odvodit, s užitím (3.17)(3.20), vztahy:

$$\begin{aligned} \hat{I}(x) &= \hat{U}_2 \hat{Y}_v \sinh \gamma(l-x) + \hat{I}_2 \cosh \gamma(l-x) & \hat{I}(x) &= \hat{C}(l-x) \cdot \hat{U}_2 + \hat{D}(l-x) \cdot \hat{I}_2 \\ \hat{U}(x) &= \hat{U}_2 \cosh \gamma(l-x) + \hat{I}_2 \hat{Z}_v \sinh \gamma(l-x) & \hat{U}(x) &= \hat{A}(l-x) \hat{U}_2 - \hat{B}(l-x) \cdot \hat{I}_2 \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} \hat{I}(x) &= \frac{\hat{U}_2 + \hat{Z}_v \cdot \hat{I}_2}{2\hat{Z}_v} \cdot e^{\gamma x} + \frac{-\hat{U}_2 + \hat{Z}_v \cdot \hat{I}_2}{2\hat{Z}_v} \cdot e^{-\gamma x} = \frac{\hat{U}_2}{\hat{Z}_v} \cdot \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} + \hat{I}_2 \cdot \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} = \\ &= \frac{\hat{U}_2}{\hat{Z}_v} \cdot \sinh \gamma x + \hat{I}_2 \cdot \cosh \gamma x = \underline{\hat{U}_2 \cdot \hat{C} + \hat{I}_2 \cdot \hat{A}} \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} \hat{U}(x) &= \frac{\hat{U}_2 + \hat{Z}_v \cdot \hat{I}_2}{2} \cdot e^{\gamma x} - \frac{-\hat{U}_2 + \hat{Z}_v \cdot \hat{I}_2}{2} \cdot e^{-\gamma x} = \hat{U}_2 \cdot \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} + \hat{I}_2 \cdot \hat{Z}_v \\ &= \hat{U}_2 \cdot \cosh \gamma x + \hat{I}_2 \hat{Z}_v \cdot \sinh \gamma x = \underline{\hat{U}_2 \cdot \hat{A} + \hat{I}_2 \cdot \hat{B}} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Pro přesný výpočet parametrů vedení podle předchozích rovnic musíme vyčíslit přenosové konstanty $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}$. Tyto konstanty obsahují hyperbolické funkce $\cosh \gamma l, \sinh \gamma l$ s komplexním argumentem γl které můžeme rozložit na reálnou a imaginární část podle [1]:

$$\begin{aligned}\cosh \gamma l &= \cosh(\alpha + j\beta)l = \cosh \alpha l \cos \beta l + j \sinh \alpha l \sin \beta l \\ \sinh \gamma l &= \sinh(\alpha + j\beta)l = \sinh \alpha l \cos \beta l + j \cosh \alpha l \sin \beta l\end{aligned}\quad (3.28)$$

Další způsob, méně přesný, je náhrada hyperbolické funkce řadou:

$$\begin{aligned}\cosh \gamma l &= 1 + \frac{(\gamma l)^2}{2!} + \frac{(\gamma l)^4}{4!} + \dots \\ \sinh \gamma l &= \gamma l + \frac{(\gamma l)^3}{3!} + \frac{(\gamma l)^5}{5!} + \dots\end{aligned}\quad (3.29)$$

Potom můžeme napsat:

$$\hat{A} = \cosh \sqrt{\hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k} \cdot l = 1 + \frac{\hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k \cdot l^2}{2} + \frac{(\hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k)^2 \cdot l^4}{24} + \dots \quad (3.30)$$

$$\hat{B} = \sqrt{\frac{\hat{Z}_k}{\hat{Y}_k}} \sinh \sqrt{\hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k} \cdot l = \hat{Z}_k \cdot l \left(1 + \frac{\hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k \cdot l^2}{6} + \frac{(\hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k)^2 \cdot l^4}{120} + \dots \right) \quad (3.31)$$

$$\hat{C} = \sqrt{\frac{\hat{Y}_k}{\hat{Z}_k}} \sinh \sqrt{\hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k} \cdot l = \hat{Y}_k \cdot l \left(1 + \frac{\hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k \cdot l^2}{6} + \frac{(\hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k)^2 \cdot l^4}{120} + \dots \right) \quad (3.32)$$

Obvykle postačuje součet dvou až tří členů řady.

Pro přesný výpočet a s použitím $\hat{Z}_v = \sqrt{\frac{\hat{Z}_k}{\hat{Y}_k}}$ a $\gamma = \sqrt{\hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k}$ použijeme následující vztahy:

$$\hat{A} = \cosh \sqrt{\hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k} \cdot l = \cosh \gamma l = \cosh(\alpha + j\beta)l = \cosh \alpha l \cos \beta l + j \sinh \alpha l \sin \beta l \quad (3.33)$$

$$\hat{B} = \sqrt{\frac{\hat{Z}_k}{\hat{Y}_k}} \sinh \sqrt{\hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k} \cdot l = \hat{Z}_v \cdot \sinh \gamma l \quad (3.34)$$

$$\hat{C} = \sqrt{\frac{\hat{Y}_k}{\hat{Z}_k}} \sinh \sqrt{\hat{Z}_k \cdot \hat{Y}_k} \cdot l = \hat{Y}_v \cdot \sinh \gamma l \quad (3.35)$$

3.1 Výkonově napět'ové rovnice pro trojfázové souměrné vedení

Někdy se jim říká výkonové rovnice přenosu. V soustavě, které je zcela souměrná (Vstupní napětí, přenos i odebíraný výkon) můžeme uvažovat při výpočtu jen „jednu fázi“. Některé vztahy lze tak přímo přepsat dosazením napětí fázových $\hat{U}_f$. [1]

Veličiny na začátku vedení *pro* $x = 0$, budeme používat index 1, na konci vedení *pro* $x = l$ index 2.

Pro trojfázový výkon v komplexním tvaru můžeme psát:

$$\hat{S}(x) = 3\hat{U}_f^*(x)\hat{I}(x) \gg \hat{I}(x) = \frac{\hat{S}(x)}{3\hat{U}_f^*(x)}; \quad \hat{I}(0) = \hat{I}_1 = \frac{\hat{S}_1}{3\hat{U}_{f1}^*}; \quad \hat{I}(l) = \hat{I}_2 = \frac{\hat{S}_2}{3\hat{U}_{f2}^*} \quad (3.36)$$

Pokud počítáme s napětím sdruženým $\hat{U}(x)$:

$$\hat{U}(x) = \sqrt{3}\hat{U}_f(x) \quad a \quad \hat{I}(x) = \frac{S(x)}{\sqrt{3}\hat{U}^*(x)} \quad (3.37)$$

Dále můžeme přepsat rovnice (3.21) a (3.25) do tvaru:

$$\hat{U}_f(x) = \hat{D}(x)\hat{U}_{f1} - \hat{B}(x)\hat{I}_1 \quad \hat{U}_f(x) = \hat{A}(l-x)\hat{U}_{f1} + \hat{B}(l-x)\hat{I}_2 \quad (3.38)$$

$$\hat{I}(x) = -\hat{C}(x)\hat{U}_{f1} + \hat{A}(x)\hat{I}_1 \quad \hat{I}(x) = \hat{C}(l-x)\hat{U}_{f2} + \hat{D}(l-x)\hat{I}_2 \quad (3.39)$$

Pak bude pro jednotlivé konstanty platit:

$$\hat{A}(l-x) = \hat{D}(l-x) = \cosh \gamma(l-x) \quad (3.40)$$

$$\hat{B}(l-x) = \hat{Z}_v \cdot \sinh \gamma(l-x) \quad (3.41)$$

$$\hat{C}(l-x) = \hat{Y}_v \cdot \sinh \gamma(l-x) \quad (3.42)$$

4 PŘÍBLIŽNÉ ŘEŠENÍ USTÁLENÉHO CHODU VEDENÍ VVN

4.1 Metoda náhradních článků

Z mnoha důvodů, především kvůli značné složitosti se v praxi s výpočtem pomocí „přesného řešení“ nesetkáme. Vedení lze nahradit dvojbranem se soustředěnými parametry a provést tak s dostatečnou přesností výpočet efektivněji. Obvykle používáme dvojbrany typu Π , T a Γ . Proudů a napětí na začátku a na konci dvojbranu jsou vázány navzájem následujícími vztahy, které se používají, pokud známe poměry na konci a máme zjistit poměry na začátku[2].

$$\hat{U}_1 = \hat{A} \cdot \hat{U}_2 + \hat{B} \cdot \hat{I}_2 \quad (4.1)$$

$$\hat{I}_1 = \hat{C} \cdot \hat{U}_2 + \hat{D} \cdot \hat{I}_2 \quad (4.2)$$

Pokud naopak známe poměry na začátku vedení a máme zjistit poměry na konci, využijeme zpětný tvar předchozích vztahů

$$\hat{U}_2 = \hat{D} \cdot \hat{U}_1 - \hat{B} \cdot \hat{I}_1 \quad (4.3)$$

$$\hat{I}_2 = -\hat{C} \cdot \hat{U}_1 + \hat{A} \cdot \hat{I}_1 \quad (4.4)$$

Kde A , B , C , D jsou přenosové konstanty vedení, závislé na jeho parametrech a vnitřním spojení prvků dvojbranu, nazývané Blondelovy konstanty a platí pro ně následující vztah

$$\hat{A} \cdot \hat{D} - \hat{B} \cdot \hat{C} = 1 \quad (4.5)$$

Pokud je dvojbran symetrický, je u něj možné zaměnit výstupní a vstupní svorky, aniž by se změnil přenosové poměry, platí

$$\hat{A} = \hat{D} \quad (4.6)$$

pak (4.5) můžeme zjednodušit na tvar

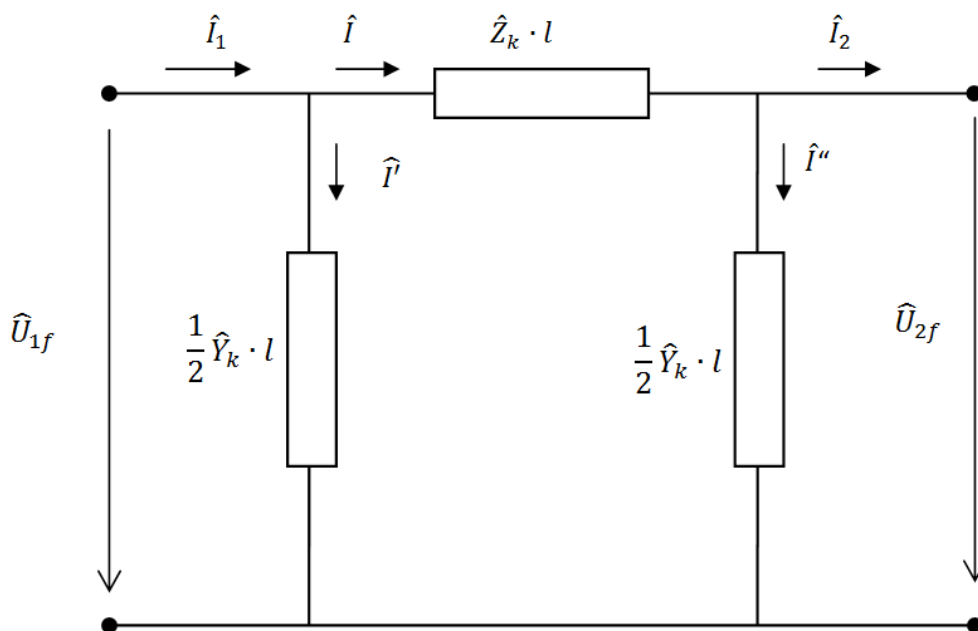
$$\hat{A}^2 - \hat{B} \cdot \hat{C} = 1 \quad (4.7)$$

Pro vedení VVN a ZVN používáme nejčastěji čtyři typy symetrických náhradních článků

- T - článek lze použít pro venkovní vedení do délky 300 km a kabelové vedení do délky 100 km. Často se používá pro trojfázové dvouvinutové transformátory.
- Π - článek, lze použít provenkovní vedení 400 km a kabelové vedení do délky 200 km.
- Γ -článek, který má dvě varianty 1.s příčným prvkem u vstupu, 2. s příčným prvkem u výstupu, oba typy jsou poměrně málo využívány. Lze je použít pro venkovní vedení do délky 100 km a kabelové vedení do délky 30 km a dvouvinutové transformátory.
- Steinmetzův článek, který má sice složitější strukturu, ale jehož výhodou je přesnost výpočtu blízká se exaktní metodě.

4.2 II-dvojbran

Patří k nejrozšířenějším, má v podélné větvi impedanci a v příčných větvích admitance rozdělené na poloviny dle obr.4-1.



Obr. 4-1 II-článek

S použitím Kirchhoffova zákona o napětích ve smyčce pak můžeme psát

$$\hat{U}_{1f} = \hat{U}_{2f} + \hat{Z}_k \cdot l \cdot \hat{I} \quad (4.8)$$

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_2 + \hat{I}' + \hat{I}'' \quad (4.9)$$

$$\hat{I} = \hat{I}_2 + \hat{I}'' \quad (4.10)$$

$$\hat{I}' = \frac{\hat{Y}_k \cdot l}{2} \cdot \hat{U}_{1f} \quad (4.11)$$

$$\hat{I}'' = \frac{\hat{Y}_k \cdot l}{2} \cdot \hat{U}_{2f} \quad (4.12)$$

Dosazením (4.10) a (4.12) do (4.8) a matematickými úpravami dostaneme

$$\hat{U}_{1f} = \hat{U}_{2f} \cdot \left(1 + \frac{\hat{Z}_k \cdot l^2 \cdot \hat{Y}_k}{2} \right) + \hat{I}_2 \cdot \hat{Z}_k \cdot l \quad (4.13)$$

Dosazením (4.11), (4.12) a (4.13) do (4.9) a dalšími úpravami dostaneme

$$\hat{I}_1 = \hat{U}_{2f} \cdot l \cdot \hat{Y}_k \cdot \left(1 + \frac{\hat{Z}_k \cdot l^2 \cdot \hat{Y}_k}{4}\right) + \hat{I}_2 \cdot \left(1 + \frac{\hat{Z}_k \cdot l^2 \cdot \hat{Y}_k}{2}\right) \quad (4.14)$$

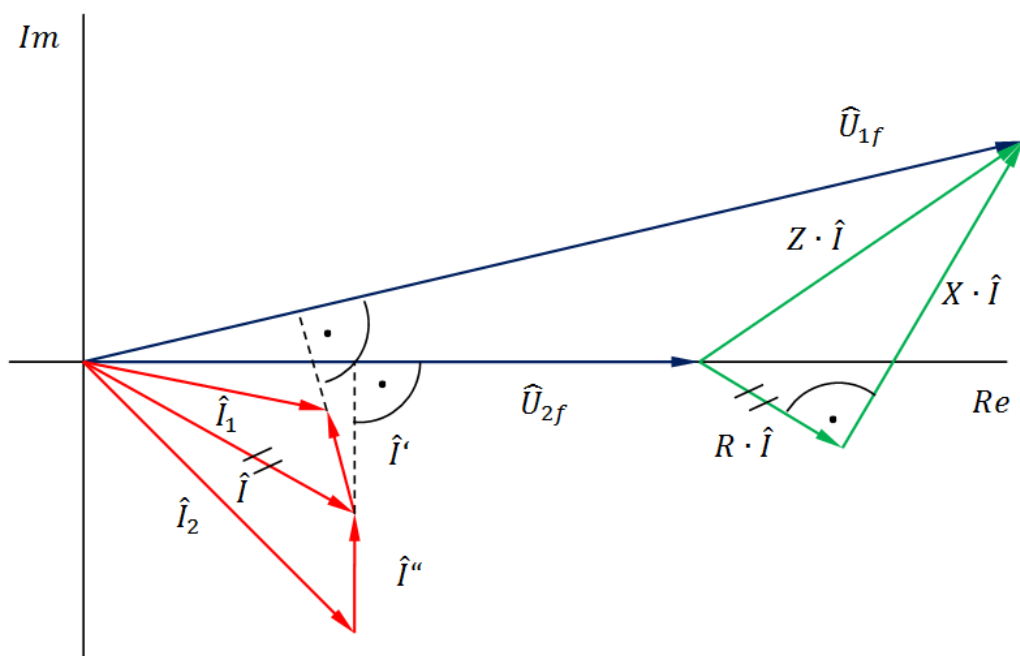
Porovnáním (4.1) s (4.13) a (4.2) s (4.14) dostaneme Blondelovy konstanty pro Π - Dvojbran

$$\hat{A} = \hat{D} = 1 + \frac{\hat{Z}_k \cdot l^2 \cdot \hat{Y}_k}{2} \quad (4.15)$$

$$\hat{B} = \hat{Z}_k \cdot l \quad (4.16)$$

$$\hat{C} = l \cdot \hat{Y}_k \cdot \left(1 + \frac{\hat{Z}_k \cdot l^2 \cdot \hat{Y}_k}{4}\right) \quad (4.17)$$

Na obr. 4-2 vidíme, ve fázorovém diagramu napěťové a proudové poměry



Obr. 4-2 Fázorový diagram Π -článku (zanedbáváme konduktanci)

Podobně bychom mohli odvodit vztahy a sestavit diagramy i pro ostatní používané dvojbrany, ale v této části se jimi nebudeme podrobněji zabývat.

5 OBECNÁ METODA ŘEŠENÍ USTÁLENÉHO CHODU

Pomocí metody náhradních dvojbranů lze řešit pouze sítě, které v jednom uzlu začínají a v druhém končí. Ve skutečnosti jsou tyto sítě pouze jednou z několika větví sítě uzlových. Uzlové sítě se používají z několika důvodů. V první řadě je to kvůli větší spolehlivosti dodávky elektrické energie, dále pak z důvodu hospodárnějšího provozu – je-li uzlová síť dobře navržena a správně řízena, jsou ztráty přenášeného výkonu menší než u sítí jednoduchých. Za další je to změna napětí při změně zatížení sítě. U zauzlených sítí není tak velká jako u sítí nezauzlených. Pokud nahradíme každou větev vedení dvojbranem, můžeme potom libovolně složitou uzlovou síť řešit pomocí soustavy výkonových rovnic. Při tomto způsobu řešení použijeme následujících zjednodušení [2]

1. Prvky s homogenně rozloženými parametry (vedení) jsou nahrazeny Π -články, ostatní prvky nahrazujeme Γ -články.
2. Trojfázová soustava je souměrná v parametrech prvků, ve zdrojích i spotřebičích, proto řešíme jen její jednofázový náhradní obvod.
3. V síti nejsou zdroje vyšších harmonických kmitočtů.
4. Parametry prvků sítě jsou konstanty nezávislé na proudu a napětí a mají lineární charakteristiku.
5. Zdroje a odběry jsou zadány pomocí výkonů.
6. Neuvažujeme statickou charakteristiku zadaných výkonů, to znamená, že výkon se nemění se změnou napětí.

Tyto výkonové rovnice definují závislost mezi komplexními výkony a napětími ve všech uzlech sítě. Budeme je odvozovat je pomocí sítě, která je znázorněna na Obr. 5-1. Nahrazením jednotlivých vedení této sítě π -články dostaneme náhradní schéma Obr. 5-2. Referenční uzel pro uzlová napětí je střední vodič spojený se zemí s označením 0.

Použité značení v náhradním schématu :

$\hat{Y}_{ij}$ Podélná admitance vedení mezi uzly i a j .

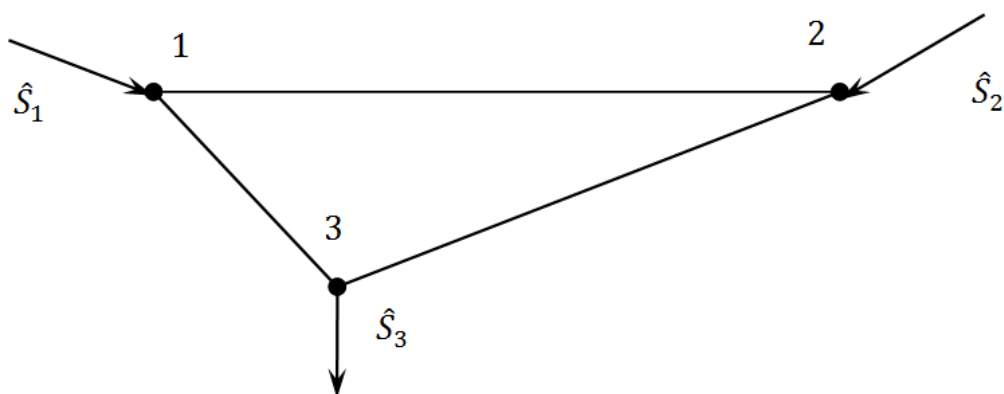
$\hat{Y}_{i0}$ Polovina sumy příčných admitancí všech vedení vycházejících z i -tého uzlu

$\hat{I}_i, \hat{S}_i$ Proud a komplexní výkon odběru nebo zdroje připojeného k i -tému uzlu.

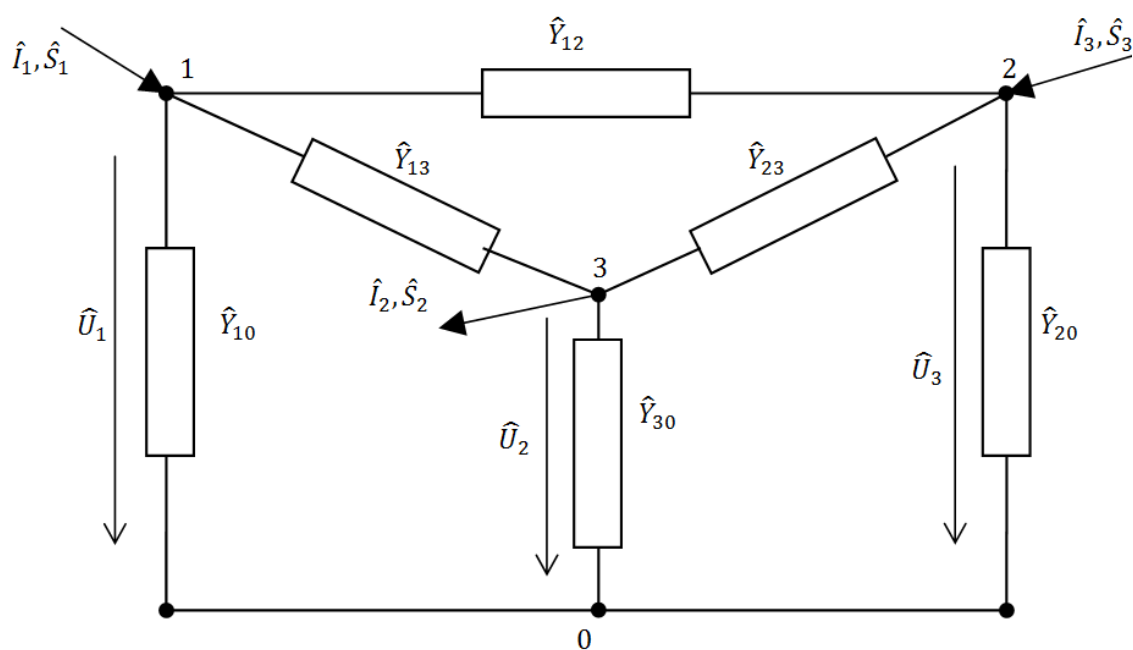
Výpočet $\hat{Y}_{i0}$

$$\hat{Y}_{i0} = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^b \hat{Y}_{ip}^{(0)} \quad (5.1)$$

kde je $\hat{Y}_{ip}^{(0)}$ příčná admitance vedení mezi uzly i a j
 b počet vedení vycházejících z i -tého uzlu



Obr. 5-1 Síť trojúhelníkového tvaru



Obr. 5-2 Náhradní schéma sítě trojúhelníkového tvaru

Použitím MUN (metody uzlových napětí) můžeme pro náhradní schéma sestavit tuto matici

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \\ \hat{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Y}_{11} & -\hat{Y}_{12} & -\hat{Y}_{13} \\ -\hat{Y}_{12} & \hat{Y}_{22} & -\hat{Y}_{23} \\ -\hat{Y}_{13} & -\hat{Y}_{23} & \hat{Y}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \\ \hat{U}_3 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$\hat{Y}_{ii}$ je součet všech větví náhradního schématu vycházejících z i-tého uzlu

$$\hat{Y}_{ii} = \hat{Y}_{i0} + \sum_{p=1}^b \hat{Y}_{ip} \quad (5.3)$$

V obecném případě, pro n uzlů, lze náhradní schéma popsat n lineárními komplexními rovnicemi tvaru

$$\hat{I}_i = \hat{Y}_{ii} \cdot \hat{U}_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \hat{Y}_{ij} \cdot \hat{U}_j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.4)$$

Pro výpočet napětí $\hat{U}_1, \hat{U}_2, \dots, \hat{U}_n$ tuto soustavu nelze použít, protože proudy na levých stranách rovnic jsou závislé na neznámých napětích.

Pro proudy platí :

$$\hat{I}_i^* = \frac{\hat{S}_i}{3 \cdot \hat{U}_i} \quad (5.5)$$

Pokud si z rovnice (5.5) vyjádříme zdánlivý výkon, který komplexně sdružíme, a za proudy dosadíme z (5.4), dostaneme výkonovou rovnici sítě

$$\hat{S}_i^* = 3 \cdot \left(\hat{Y}_{ii} \cdot \hat{U}_i^2 - \hat{U}_i^* \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \hat{Y}_{ij} \cdot \hat{U}_j \right) \quad (5.6)$$

Z hlediska neznámých napětí jde o kvadratické komplexní rovnice, které můžeme řešit například některou z numerických metod.

6 ZVLÁŠTNÍ PŘÍPADY USTÁLENÉHO CHODU

6.1 Chod vedení nakrátko

Pro výpočet chodu nakrátko uvažujeme, že

$$\hat{U}_{2k} = 0 \quad \hat{S}_{2k} = 0 \quad \hat{I}_{2k} \neq 0 \quad |\hat{Z}_{2k}| = 0$$

Pro veličiny budeme v tomto případě používat dolní index „k“
Dosazením do (4.8) můžeme psát

$$\hat{U}_{1k} = \hat{Z}_k \cdot l \cdot \hat{I}_2 \quad (6.1)$$

Dále vidíme, že pokud $\hat{U}_{2k} = 0$, bude také $I'' = 0$ (4.12) a potom můžeme psát

$$\hat{I}_k = \hat{I}_2 \quad (6.2)$$

Podobně přepíšeme vztah (4.9) dosazení za I' z (4.11)

$$\hat{I}_{1k} = \hat{I}_k + \frac{\hat{Y}_k \cdot l}{2} \cdot \hat{U}_{1k} \quad (6.3)$$

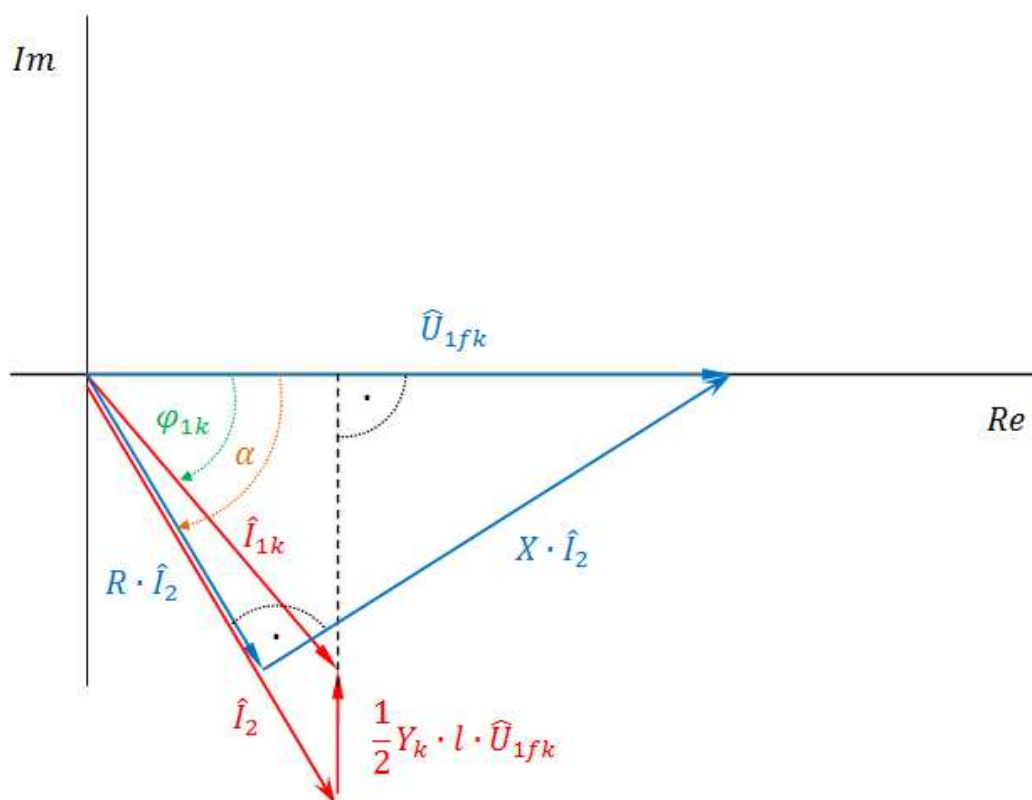
Vložíme-li do rovnice (4.3) $\hat{U}_2 = \hat{U}_{2k} = 0$ a za $\hat{I}_1 = \hat{I}_{1k}$ dosadíme $\frac{\hat{S}_1}{\hat{U}_1^*}$ můžeme po úpravě psát vztah pro vstupní výkon nakrátko

$$\hat{S}_{1k} = \frac{\hat{D}}{\hat{B}} \cdot U_{1k}^2 = \frac{U_{1k}^2}{\hat{Z}_{1k}} \quad (6.4)$$

Zároveň, pro vstupní impedanci nakrátko můžeme napsat

$$\hat{Z}_{1k} = \frac{\hat{B}}{\hat{A}} \quad (6.5)$$

Fázorový diagram na obr. 6-1. znázorňuje vzájemné poměry jednotlivých veličin (jejich vektorů). Především induktivní charakter impedance nakrátko a úhel φ_{1k} který je záporný a blízký úhlu vedení α . Také je patrná rozdílná velikost proudu nakrátko, na začátku a na konci vedení.

Obr. 6-1 Fázorový diagram Π -článku při chodu nakrátko

6.2 Chod naprázdno

Pro výpočet chodu naprázdno uvažujeme, že:

$$\hat{U}_{20} \neq 0 \quad \hat{S}_{20} = 0 \quad \hat{I}_{20} = 0 \quad |\hat{Z}_{20}| = \infty$$

proto použijeme a upravíme vztah (4.10) následujícím způsobem, pro veličiny budeme v tomto případě používat dolní index „0“

$$\hat{I}_0 = \frac{\hat{Y}_k \cdot l}{2} \cdot \hat{U}_{20} \quad (6.6)$$

Rovnici (4.9) upravíme do tvaru:

$$\hat{I}_{10} = \hat{I}_0 + \frac{\hat{Y}_k \cdot l}{2} \cdot \hat{U}_{10} \quad (6.7)$$

Nakonec vztah pro napětí naprázdno, z (4.8) dostaneme

$$\hat{U}_{10} = \hat{U}_{20} + \hat{Z}_k \cdot l \cdot \hat{I}_0 \quad (6.8)$$

Nebo s použitím (3.1) a dosazením za $\hat{I}_2 = 0$ můžeme psát

$$\hat{U}_{10} = A \cdot \hat{U}_{20} \quad (6.9)$$

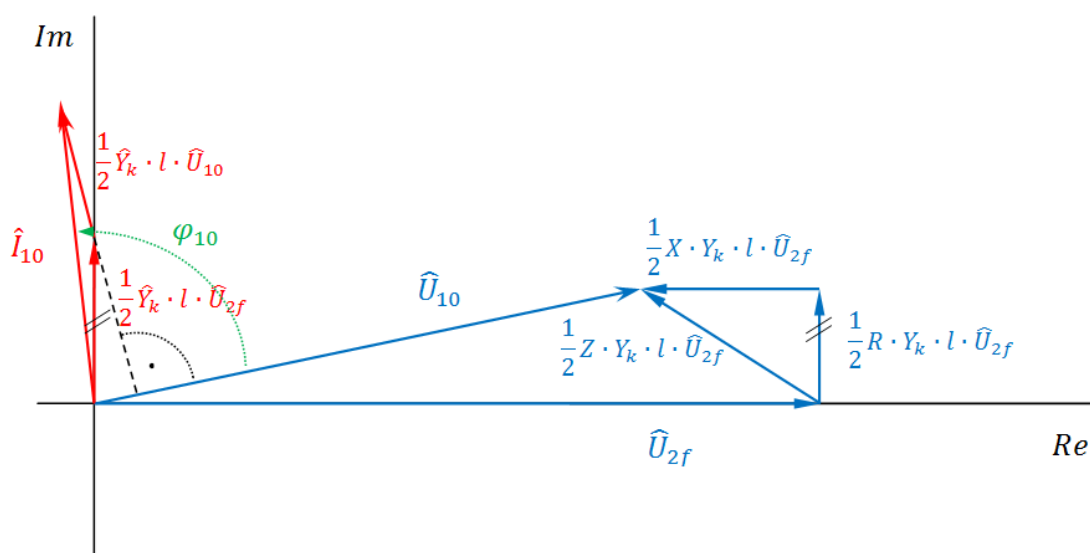
Vstupní impedanci naprázdno vypočítám podle vztahu (3.33)

$$\hat{Z}_{10} = \frac{\hat{A}}{\hat{C}} \quad (6.10)$$

Pro vstupní výkon naprázdno na vstupu pak bude platit

$$\hat{S}_{10} = \frac{\hat{C}}{\hat{A}} U_{10}^2 \quad (6.11)$$

Fázorový diagram na obr. 6-2. znázorňuje vzájemné poměry jednotlivých veličin (jejich vektorů) při chodu naprázdno. Impedance naprázdno, zde má naopak, kapacitní charakter a fázový posun φ_0 napětí a proudu na začátku je kladný blíží se téměř 90° . Při chodu naprázdno, nebo s malým zatížením nastává tzv. Ferrantiho jev, kdy napětí na konci vedení je větší než na začátku. Tento jev může, při dostatečně dlouhém vedení a při náhlém odpojení zátěže vedení, způsobit poškození izolace.



Obr. 6-2 Fázorový diagram Π -članku při chodu naprázdno

6.3 Chod s přirozeným výkonem

Jestliže je vedení zatíženo spotřebičem o impedanci, která je rovna impedanci vlnové, mluvíme o chodu vedení s přirozeným výkonem. Pro chod vedení s přirozeným výkonem bude platit:

$$\hat{Z}_2 = \hat{Z}_V = Z_V \angle \xi = \frac{\hat{U}_2}{\hat{I}_2} = \sqrt{\frac{\hat{Z}_k}{\hat{Y}_k}} \quad (6.12)$$

Pokud dosadíme za B(l) a D(l) z rovnic (3.40), (3.41) můžeme napsat:

$$\hat{U}_{fp}(l) = \hat{U}_{fp1} \cosh \gamma l - \hat{Z}_V \sinh \gamma l \frac{1}{\hat{Z}_V} \hat{U}_{fp1} \quad (6.13)$$

S použitím rovnice pro hyperbolické funkce (3.20) dostaneme:

$$\hat{U}_{fp}(l) = \hat{U}_{fp1}(\cosh \gamma l - \sinh \gamma l) = e^{-\gamma l} \hat{U}_{fp1} = e^{-\alpha l} \cdot e^{-j\beta l} \cdot \hat{U}_{fp1} \quad (6.14)$$

Pokud potřebujeme počítat s napětím sdruženým, vynásobíme rovnici $\sqrt{3}$

$$\hat{U}_p(l) = e^{-\alpha l} \cdot e^{-j\beta l} \cdot \hat{U}_{p1} \quad (6.15)$$

Na vedení, v chodu s přirozeným výkonem, se napětí i proud šíří pouze postupnými vlnami. K odrazu na konci vedení nedochází. Podél vedení dochází k útlumu a natáčení fázorů napětí a proudu, ale jejich poměr a vzájemný fázový posun ξ je konstantní. Z čehož plyne, že v každém místě vedení je impedance stejná a je rovna impedanci vlnové. Při přenosu přirozeného výkonu se kromě činného výkonu přenáší také malá část jalového výkonu, kapacitního charakteru. Přirozený výkon není největším přenositelným výkonem.

Trojfázový přirozený výkon na konci vedení počítáme podle rovnice:

$$\hat{S}_{p2} = 3 \cdot \hat{U}_{2fp}^* \cdot \hat{I}_{2p} = \sqrt{3} \cdot \hat{U}_{2fp}^* \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{\hat{U}_{2fp}}{\hat{Z}_V} = \frac{U_{2p}^2}{\hat{Z}_V} \rightarrow \hat{S}_{p1} = \frac{U_{1p}^2}{\hat{Z}_V} \quad (6.16)$$

Podle rovnice (6.15) můžeme také napsat:

$$\hat{S}_{p2} = \frac{U_{p1}^2}{\hat{Z}_V} \cdot e^{-\alpha l} = \hat{S}_{p1} \cdot e^{-\alpha l} = \frac{U_{p1}^2}{\hat{Z}_V} \cdot e^{-\alpha l} \angle -\xi \quad (6.17)$$

Pro poměrnou účinnost platí:

$$\eta = \frac{P_{p2}}{P_{p1}} = \frac{Re(S_{p2})}{Re(S_{p1})} = e^{-2\alpha l} < 1 \quad (6.18)$$

7 GRAFICKÉ METODY VÝPOČTU

V dnešní době se s těmito metodami v praxi většinou nesetkáváme. Pro svoji přehlednost a názornost se s nimi lze setkat v nauce o elektrických vedeních nebo tam, kde není možné použít výpočetní techniku. Tyto metody vznikaly snahou usnadnit a zpřehlednit výpočet bez, v té době, nedostupné výpočetní techniky.

Pomocí nich bylo možno stanovit pouze jeden provozní stav vedení, což v praxi mohl být problém, vzhledem k tomu, že při řízení elektrických vedení se vstupní podmínky mění. Tyto metody, bez opakování celého výpočtu, dávají přehled o provozních poměrech na obou koncích vedení.

Pro výpočet se používalo několik grafických metod. Ovšem všechny vycházejí z určitých předpokladů, např. konstantního napětí na začátku nebo na konci vedení. Jejich platnost je tedy omezena a přesnost těchto metod je silně závislá na preciznosti grafického zpracování [2].

- Fázorový diagram $U, I = f(P, Q)$ - vychází ze superpozice stavu naprázdno a nakrátko.
- Trojpolový diagram - odstraňuje nevýhodu kreslení dvou fázorových diagramů pro napětí a proud (U_1, I_1). Vychází ze základních rovnic (3.26) a (3.27), . Lze tedy pomocí něj graficky určit, pro jakékoliv zadané I_2 a konstantní U_2, U_1, I_1 na začátku vedení.
- Fallouův diagram - zjednodušuje trojpolový diagram pro vedení 400 km. Vychází z rozvinutých hyperbolických funkcí v řady tak, že zjednodušuje pro $\cosh x$ na dva členy a pro $\sinh x$ pouze na jeden člen. Diagram se kreslí v procentních hodnotách napětí ($U_2 = 100\%$).
- Kružnicový diagram - vychází z výkonových rovnic přenosu. Diagram lze použít pro grafické určení výkonů S_1, S_2 pro různá napětí a jejich fázi na začátku a na konci vedení. Pokud je potřeba určit více provozních stavů, vychází se obvykle z omezujících podmínky, např. jedno napětí volíme konstantní.

8 USTÁLENÝ CHOD VEDENÍ- PŘESNÝ VÝPOČET

Výpočet budeme provádět pomocí rovnic pro vedení s rovnoměrně rozloženými parametry, které byly odvozeny v teoretické části.

Zadané parametry vedení:

<i>Délka</i>	$l = 0 - 1000 \text{ km (po } 100 \text{ km)}$
<i>Jmenovité napětí transponovaného vedení</i>	$U_n = 220 \text{ kV}$
<i>Podélná provozní impedance na 1 km</i>	$Z_{1km} = (0,085 + j0,418) \Omega$
<i>Příčná provozní admitance na 1 km</i>	$Y_{1km} = (0,033 + j2,663) \cdot 10^{-6} \text{ S}$

Výpočet veličin, které budou použity v dalších částech řešení:

Vlnovou impedanci vedení vypočítáme podle (6.12)

$$\begin{aligned} \hat{Z}_V &= \sqrt{\frac{\hat{Z}_{1km}}{\hat{Y}_{1km}}} = \sqrt{\frac{(0,085 + j0,418) \Omega \cdot km^{-1}}{(0,033 + j2,663) \cdot 10^{-6} S \cdot km^{-1}}} = 400,207 \angle -5,39^\circ \Omega = \\ &= \underline{(398,437 - j37,593) \Omega} \end{aligned}$$

činitel přenosu (šíření) vypočítáme podle vztahu (3.16)

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{\hat{Z}_{1km} \cdot \hat{Y}_{1km}} = \sqrt{(0,085 + j0,418) \Omega \cdot km^{-1} \cdot (0,033 + j2,663) \cdot 10^{-6} S \cdot km^{-1}} = \\ &= 1,0658 \cdot 10^{-3} \angle 83,90^\circ km^{-1} = \underline{(0,1133 + j1,0598) \cdot 10^{-3} km^{-1}} \end{aligned}$$

Z činitele přenosu, vyjádřeného ve složkovém tvaru $\gamma = \alpha + j \cdot \beta$ můžeme stanovit:

Reálnou část, která představuje činitel tlumení $\alpha = 0,1133 \cdot 10^{-3} km^{-1}$

Imaginární část, která představuje činitel fázového natočení $\beta = 1,0598 \cdot 10^{-3} km^{-1}$

Nyní vypočteme přenosové konstanty vedení **A, B, C, D** podle vztahů (3.40) až (3.41)

nejdříve určíme $\cosh \gamma x$ a $\sinh \gamma x$, kde za x budeme dosazovat délku vedení l po jednotlivých úsecích vedení

$$\sinh \gamma l = \sinh \alpha l \cdot \cos \beta l + j \cosh \alpha l \cdot \sin \beta l$$

$$\cosh \gamma l = \cosh \alpha l \cdot \cos \beta l + j \sinh \alpha l \cdot \sin \beta l$$

příklad výpočtu pro délku vedení $l = 200 \text{ km}$:

$$\cosh \alpha l = \cosh(0,1133 \cdot 10^{-3} \cdot 200) = 1,000257$$

$$\sinh \alpha l = \sinh(0,1133 \cdot 10^{-3} \cdot 200) = 0,022662$$

$$\sin \beta l = \sin(1,0598 \cdot 10^{-3} \cdot 200) = 0,210376$$

$$\cos \beta l = \cos(1,0598 \cdot 10^{-3} \cdot 200) = 0,977620$$

$$\sinh \gamma l = 0,022662 \cdot 0,977620 + j1,000257 \cdot 0,210376 = \underline{0,02215 + j0,21043}$$

$$\cosh \gamma l = 1,000256 \cdot 0,977620 + j0,022662 \cdot 0,210376 = \underline{0,97787 + j0,004767}$$

Příklad výpočtu konstant **A, B, C, D** pro $l = 200 \text{ km}$:

$$\hat{A} = \hat{D} = \cosh \gamma x = (0,97787 + j0,004767) = \underline{0,97788 \angle 0,279^\circ}$$

$$\hat{B} = \hat{Z}_V \sinh \gamma x = (398,437 - j37,593)\Omega \cdot (0,02215 + j0,21043) = \underline{(16,7375 + j83,0089)\Omega}$$

$$\hat{C} = \frac{1}{\hat{Z}_V} \sinh \gamma x = \frac{1}{398,437 - j37,593} \cdot (0,02215 + j0,21043) = \underline{(5,721 + j528,67) \cdot 10^{-6} S}$$

8.1 Stanovení poměrů na vedení při přenosu přirozeného výkonu

Pro výpočet fázoru napětí a přirozeného výkonu $\hat{U}_{p2}$; $\hat{S}_{p2}$ na konci vedení použijeme vztahy (6.15 až 6.17) a výpočet opakujeme postupně pro jednotlivé úseky na vedení.

Příklad výpočtu pro $l = 200 \text{ km}$:

$$\begin{aligned} \hat{U}_{p2} &= e^{-\alpha l} \cdot U_n \cdot e^{-j\beta l} = e^{-0,1133 \cdot 10^{-3} \cdot 200} \cdot 220 \cdot e^{-j1,0598 \cdot 10^{-3} \cdot 200} = (210,258 - j45,246) = \\ &= \underline{215,071 \angle -12,14^\circ \text{ kV}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{S}_{p2} &= \frac{U_n^2}{Z_V} e^{-2\alpha l} \angle -\xi = \frac{220^2}{400 \cdot 2055} e^{-2 \cdot 0,1133 \cdot 10^{-3} \cdot 200} \angle 5,39^\circ = (115,068 + j10,857) \text{ MVA} = \\ &= \underline{115,579 \angle 5,39^\circ \text{ MVA}} \end{aligned}$$

Reálnou a imaginární část komplexního výkonu určíme z jeho vyjádření ve složkovém tvaru:

$$P_{p2} = \text{Re}\{\hat{S}_{p2}\} = \underline{115,068 \text{ MW}}$$

$$Q_{p2} = \text{Im}\{\hat{S}_{p2}\} = \underline{10,857 \text{ MVar}}$$

Účinnost přenosu (6.18) a ztráty vypočítáme podle známých vztahů:

$$\eta = \frac{P_{p2}}{P_{p1}} = e^{-2\alpha l} = e^{-2 \cdot 0,1133 \cdot 10^{-3} \cdot 200} = \underline{0,9557}$$

$$\Delta P_{p2} = P_{p1} - P_{p2} = \underline{5,3349 \text{ MW}}$$

Zbývá vypočíst fázor proudu pro každou délku vedení:

$$\hat{S}_{p2} = 3\hat{U}_f^* I_p \rightarrow I_p = \frac{\hat{S}_{p2}}{3\hat{U}_f^*} \rightarrow I_p = \frac{\hat{S}_{p2}}{\sqrt{3}\hat{U}_{p2}^*}$$

příklad výpočtu pro $l = 200 \text{ km}$:

$$\hat{I}_p = \frac{\hat{S}_{p2}}{\sqrt{3}\hat{U}_{p2}^*} = \frac{115,579 \angle 5,39^\circ \text{ MVA}}{\sqrt{3}(215,071 \angle -12,14^\circ \text{ kV})^*} = (308,117 - j36,468) \text{ A} = \underline{310,268 \angle -6,75^\circ \text{ A}}$$

8.2 Stanovení poměrů na vedení při chodu naprázdno

Pro výpočet parametrů při chodu naprázdno použijeme již vypočítané Blondelovy konstanty pro každou délku vedení zvlášť. Počítáme podle vztahů (6.6 až 6.11)

příklad výpočtu *pro* $l = 200 \text{ km}$:

impedance naprázdno:

$$\hat{Z}_{10} = \frac{\hat{A}}{\hat{C}} = \frac{0,97787 + j0,004767}{0,02215 + j0,21043} = \underline{(29,0307 - j1849,36)\Omega} = \underline{1849,587\angle -89,1^\circ \Omega}$$

admitance naprázdno:

$$\hat{Y}_{10} = \frac{\hat{C}}{\hat{A}} = \frac{0,02215 + j0,21043}{0,97787 + j0,004767} = \underline{(8,489 - j540,603)\mu S} = \underline{540,669\angle 89,1^\circ \mu S}$$

výkon naprázdno:

$$\begin{aligned}\hat{S}_{10} &= \frac{\hat{C}}{\hat{A}} U_{10}^2 = \frac{0,02215 + j0,21043}{0,97787 + j0,004767} \cdot 220^2 = \underline{(0,4107 + j26,1648)MVA} = \\ &= \underline{26,168\angle 89,1^\circ MVA}\end{aligned}$$

proud naprázdno vypočítáme podle:

$$\hat{I}_{10} = \frac{\hat{S}_{10}}{\sqrt{3}\hat{U}_{10}^*} = \frac{(26,168\angle 89,1^\circ) \cdot 10^6 VA}{\sqrt{3} \cdot (220 \cdot \angle 0^\circ) \cdot 10^3 V} = \underline{68,67\angle 89,1^\circ A}$$

fázor napětí naprázdno:

$$\hat{U}_{20} = \frac{U_{10}}{\hat{A}} = \frac{220}{0,97787 + j0,004767} = \underline{(224,973 - j1,0968)kV} = \underline{224,9758\angle -0,279^\circ kV}$$

reálná a imaginární složka komplexního výkonu naprázdno:

$$P_{10} = \text{Re}\{\hat{S}_{10}\} = \underline{0,4107 MW}$$

$$Q_{10} = \text{Im}\{\hat{S}_{10}\} = \underline{26,1648 MVar}$$

8.3 Stanovení poměrů na vedení při chodu nakrátko

Pro výpočet parametrů při chodu nakrátko použijeme předem vypočítané Blondelovy konstanty pro každou délku vedení zvlášť. Počítáme podle vztahů (6.1 až 6.5)

příklad výpočtu *pro* $l = 200 \text{ km}$:

impedance nakrátko:

$$\hat{Z}_{1k} = \frac{\hat{B}}{\hat{D}} = \frac{16,7375 + j83,0089}{0,97787 + j0,004767} = \underline{(17,5297 + j84,8018)\Omega} = \underline{86,59\angle 78,32^\circ \Omega}$$

admitance nakrátko:

$$\hat{Y}_{1k} = \frac{1}{\hat{Z}_{1k}} = \frac{1}{(2,3377 + j11,3089) \cdot 10^{-3} \Omega} = 0,01155 \angle -78,32^\circ \text{ S}$$

výkon nakrátko:

$$\hat{S}_{1k} = \frac{U_{1k}^2}{\hat{Z}_{1k}} = \frac{220 \cdot 10^3}{17,5297 + j84,8018} = (113,1457 - j547,3537) \Omega = 558,93 \angle -78,32^\circ \text{ MVA}$$

reálná a imaginární složka komplexního výkonu naprázdno:

$$P_{1k} = \text{Re}\{\hat{S}_{1k}\} = 113,1457 \text{ MW}$$

$$Q_{1k} = \text{Im}\{\hat{S}_{1k}\} = 547,3537 \text{ MVar}$$

proud nakrátko vypočítáme podle:

$$I_{1k} = \frac{\hat{S}_{1k}}{\sqrt{3} \hat{U}_{1k}^*} = \frac{(558,93 \angle -78,32^\circ) \cdot 10^6 \text{ VA}}{\sqrt{3} \cdot (220 \cdot \angle 0^\circ) \cdot 10^3 \text{ V}} = 1467 \angle -78,32^\circ \text{ A}$$

9 ZÁVĚRY PRÁCE A JEJÍ PŘÍNOS

V práci bylo pojednáno o hlavních metodách řešení ustáleného chodu vedení VVN a ZVN. Tyto metody můžeme rozdělit na dvě skupiny. První je metoda přesného řešení, která vychází z takzvaných Telegrafních rovnic, druhou nazýváme „přibližné řešení“ ustáleného chodu vedení. Při použití metody přesného výpočtu je zapotřebí vyčíslit hyperbolické funkce sinus a cosinus, například součtem řady Taylorova rozvoje těchto funkcí. Obvykle postačuje součet prvních tří členů. Přibližné řešení, kde provádíme náhradu vedení dvojbrany, je použitelné do délky vedení 400-500 km, podle typu použitého dvojbranu, je výpočtově jednodušší, ale není tak přesné.

V Práci řešíme zvláštní případy ustáleného chodu vedení 220 kV, s konkrétními parametry. Jedná se o chod při přenosu přirozeného výkonu, dále chod naprázdno a chod nakrátko. Cílem bylo zhodnotit a posoudit, na konkrétním zadání, parametry a průběh veličin při měnící se délce vedení. Výpočet je proveden metodou přesného řešení, výsledky jsou pak zpracovány tabelárně a průběh vybraných veličiny zakreslen do grafů.

Pro úplnost je v práci uvedena obecná metoda řešení sítí VVN a ZVN, která slouží především k výpočtům zauzlených sítí a také je zde uveden krátký přehled grafických metod, jež se hojně využívaly především před nástupem výpočetní techniky.

9.1 získané výsledky a jejich zhodnocení

V tabulce (Tab. 8-1) jsou přehledně vyjádřeny hodnoty jednotlivých veličin na vedení při přenosu přirozeného výkonu. Z výsledků je pak zvláště patrný vzestup ztrát a s tím i pokles účinnosti přenosu s prodlužující se délkou vedení.

l	U_{p2}/U_{p1}	U_{p2}	θ_{pU}	P_{p2}	Q_{p2}	ΔP_p	I_p	θ_{pI}	η_p	$\cos\varphi_p$
[km]	[-]	[kV]	[°]	[MW]	[MVar]	[MW]	[A]	[°]	[-]	[-]
0	1,000	220,000	0,00	120,403	11,3602	-	317,38	5,39	-	1,00
100	0,989	217,521	-6,07	117,706	11,1057	2,6976	313,80	-0,68	0,978	1,00
200	0,978	215,071	-12,14	115,068	10,8569	5,3348	310,27	-6,75	0,956	0,99
300	0,967	212,648	-18,22	112,490	10,6136	7,9130	306,77	-12,83	0,934	0,98
400	0,956	210,252	-24,29	109,970	10,3758	10,4333	303,32	-18,90	0,913	0,95
500	0,945	207,883	-30,36	107,506	10,1434	12,8972	299,90	-24,97	0,893	0,91
600	0,934	205,541	-36,43	105,097	9,9161	15,3059	296,52	-31,04	0,873	0,86
700	0,924	203,226	-42,51	102,743	9,6939	17,6606	293,18	-37,12	0,853	0,80
800	0,913	200,936	-48,58	100,441	9,4767	19,9626	289,88	-43,19	0,834	0,73
900	0,903	198,672	-54,65	98,190	9,2644	22,2130	286,61	-49,26	0,816	0,65
1000	0,893	196,434	-60,72	95,990	9,0568	24,4130	283,38	-55,33	0,797	0,57

Tab. 8-1 hodnoty na vedení při přenosu přirozeného výkonu

V následující tabulce (Tab. 8-2 a 8-3) vidíme změny hodnot jednotlivých veličin při chodu naprázdno. Zvláště je pak patrný ferrantiho jev kdy napětí na konci vedení je vyšší než na začátku. V našem případě (při délce vedení 1000 km) dosahuje dvojnásobku hodnoty napětí na začátku. Tento jev se projevuje zvláště u málo zatížených nebo nezatížených vedení VVN a ZVN a je závislý kvadraticky na délce vedení. Jedná se o formu „provozního“ přepětí. Impedance naprázdno má kapacitní charakter a fázový posun φ_0 napětí a proudu na začátku se blíží téměř 90° .

l	U_{20}	θ_{0U}	I_{10}	θ_{0I}	P_{10}	Q_{10}	Z_{10}	θ_{0Z}
[km]	[kV]	[°]	[A]	[°]	[MW]	[MVA _r]	[Ω]	[°]
0	220,000	0,00	0,00	-	0,0000	0,0000	-	-
100	221,227	-0,07	34,0	89,242	0,1713	12,9369	3740,915	-89,242
200	224,976	-0,28	68,7	89,100	0,4108	26,1652	1849,559	-89,100
300	231,460	-0,64	105,0	88,855	0,7996	40,0023	1209,689	-88,855
400	241,067	-1,17	143,9	88,488	1,4467	54,8207	882,570	-88,488
500	254,418	-1,90	186,7	87,973	2,5155	71,0895	680,406	-87,973
600	272,473	-2,87	235,0	87,268	4,2675	89,4341	540,566	-87,268
700	296,705	-4,15	291,2	86,306	7,1495	110,7306	436,188	-86,306
800	329,439	-5,85	359,0	84,981	11,9683	136,2639	353,831	-84,981
900	374,456	-8,15	444,0	83,115	20,2847	167,9850	286,043	-83,115
1000	438,200	-11,38	556,1	80,394	35,3597	208,9161	228,423	-80,394

Tab. 8-2 hodnoty na vedení při chodu naprázdno

l	Y_{10}	θ_{0Y}	$Re\{Z_{10}\}$	$Im\{Z_{10}\}$	$Re\{Y_{10}\}$	$Im\{Y_{10}\}$
[km]	[μS]	[°]	[Ω]	[Ω]	[μS]	[μS]
0	-	-	-	-	-	-
100	267,314	89,242	49,517	-3740,587	3,538	267,291
200	540,669	89,100	29,038	-1849,331	8,489	540,603
300	826,659	88,855	24,175	-1209,448	16,520	826,494
400	1133,054	88,488	23,283	-882,263	29,891	1132,660
500	1469,710	87,973	24,061	-679,981	51,973	1468,791
600	1849,914	87,268	25,765	-539,951	88,172	1847,811
700	2292,587	86,306	28,105	-435,282	147,717	2287,823
800	2826,208	84,981	30,958	-352,474	247,278	2815,369
900	3495,976	83,115	34,291	-283,980	419,105	3470,763
1000	4377,837	80,394	38,119	-225,220	730,572	4316,448

Tab. 8-3 hodnoty na vedení při chodu naprázdno

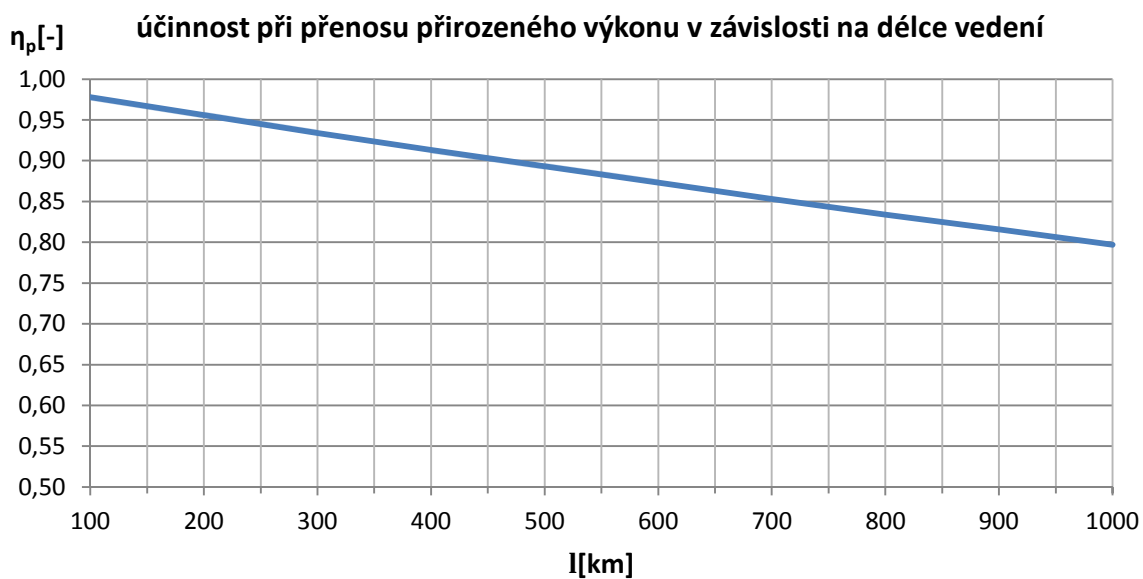
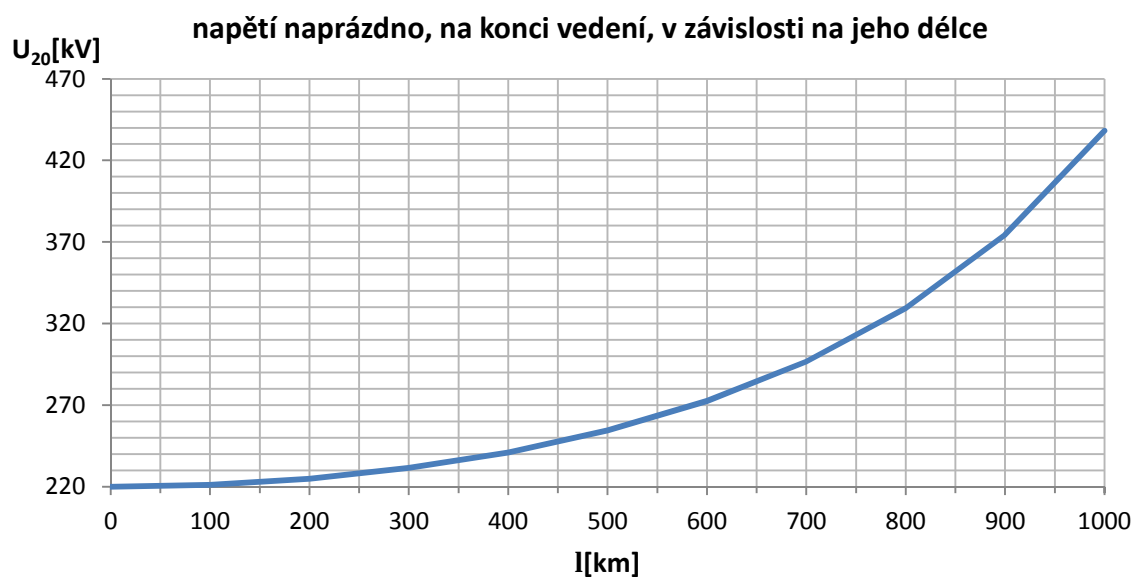
Při chodu nakrátko (Tab. 8-4 a 8-5) vidíme nárůst zkratového proudu se zkracujícím se vedením. Dále je zde patrný induktivní charakter impedance nakrátko a fázový posun θ_{kl} proudu I_{lk} , který je záporný.

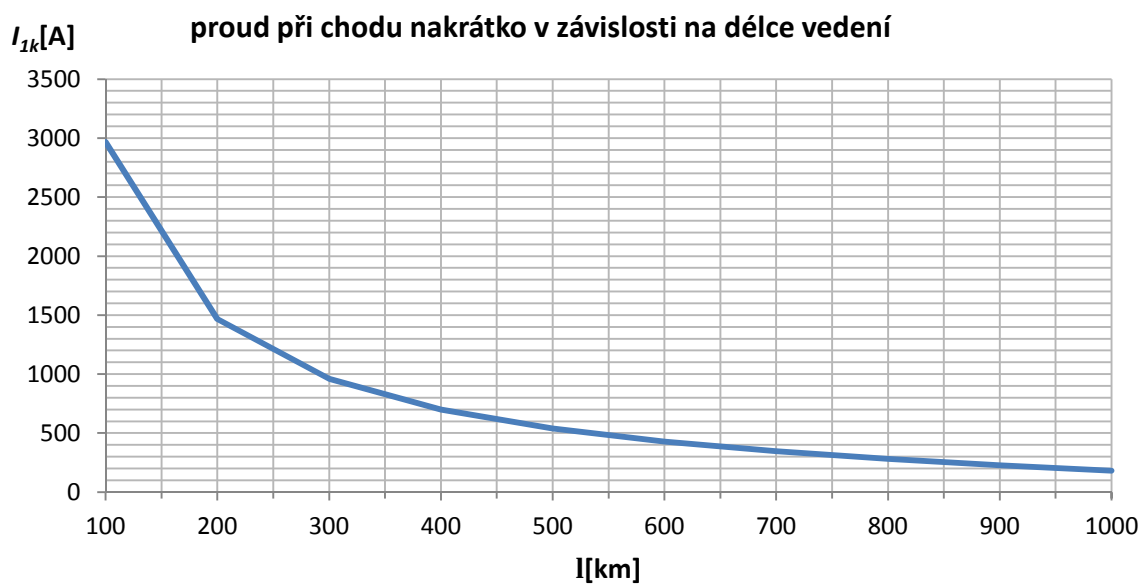
l	P_{lk}	Q_{lk}	Z_{lk}	θ_{kz}	$Re\{Z_{lk}\}$	$Im\{Z_{lk}\}$
[km]	[MW]	[MVAr]	[Ω]	[$^\circ$]	[Ω]	[Ω]
0	-	-	-	-	-	-
100	226,1212	-1107,6193	42,814	78,462	8,564	41,949
200	113,1462	-547,3450	86,596	78,320	17,530	84,803
300	75,5356	-357,6661	132,401	78,075	27,358	129,544
400	56,7782	-260,5897	181,475	77,708	38,634	177,315
500	45,5758	-200,4968	235,395	77,193	52,178	229,540
600	38,1671	-158,8319	296,290	76,488	69,228	288,089
700	32,9457	-127,6279	367,191	75,526	91,778	355,536
800	29,1124	-102,8845	452,658	74,201	123,246	435,557
900	26,2305	-82,3632	559,931	72,335	169,914	533,528
1000	24,0456	-64,7036	701,174	69,614	244,254	657,255

Tab. 8-4 hodnoty na vedení při chodu nakrátko

l	Y_{lk}	θ_{ky}	$Re\{Y_{10}\}$	$Im\{Y_{10}\}$	I_{lk}	θ_{kl}
[km]	[mS]	[$^\circ$]	[mS]	[mS]	[A]	[$^\circ$]
0	-	-	-	-	-	-
100	23,357	-78,462	4,672	-22,885	2967	-78,462
200	11,548	-78,320	2,338	-11,309	1467	-78,320
300	7,553	-78,075	1,561	-7,390	959	-78,075
400	5,510	-77,708	1,173	-5,384	700	-77,708
500	4,248	-77,193	0,942	-4,142	540	-77,193
600	3,375	-76,488	0,789	-3,282	429	-76,488
700	2,723	-75,526	0,681	-2,637	346	-75,526
800	2,209	-74,201	0,601	-2,126	281	-74,201
900	1,786	-72,335	0,542	-1,702	227	-72,335
1000	1,426	-69,614	0,497	-1,337	181	-69,614

Tab. 8-5 hodnoty na vedení při chodu nakrátko

obr. 8-1 Grafické zobrazení hodnot η_p .obr. 8-2 Grafické zobrazení hodnot U_{20} při chodu naprázdno.



obr. 8-3 Grafické zobrazení hodnot I_{1k} při chodu nakrátko.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BLAŽEK, V., PAAR, M. Přenosové sítě [on-line]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007, [cit. 4.5.2013], 123 stran www.feec.vutbr.cz (elektronická skripta pouze pro posluchače FEKT VUT).
- [2] BLAŽEK, V., SKALA, P. Distribuce elektrické energie [on-line]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2007, [cit. 10.5.2013], 140 stran www.feec.vutbr.cz (elektronická skripta pouze pro posluchače FEKT VUT).
- [3] ČEPS, AS. Stránky společnosti [on-line]. [cit. 20.5.2013], www.ceps.cz
- [4] Hodinka M., Fecko Š., Němeček F.: *Přenos a rozvod elektrické energie*. SNTL Praha, 1989.
- [5] Reiss L., Malý K., Pavlíček Z., Němeček F.: *Teoretická elektroenergetika I*. ALFA Bratislava, 1977.