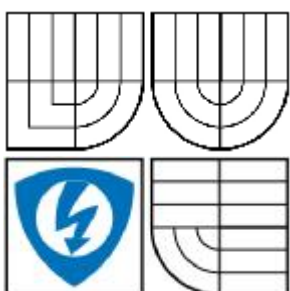


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

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 400 KV

STABILIZED OPERATION OF THE 400 KV POWER LINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ONDŘEJ JURČA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. VLADIMÍR BLAŽEK, CSc.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Ondřej Jurča

ID: 98205

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Ustálený chod vedení 400 kV

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- Pojednejte o metodách řešení vedení zvn
- Pro trojfázové transponované vedení se jmenovitým napětím $U_n = 400$ kV, délce $l = 300$ km a se zadanými parametry vhodnými výpočtovými metodami určete:
 - poměry na začátku vedení, je-li na jeho konci odebrán činný výkon 350 MW. Účinník odběru je 0,9 ind. a napětí na konci vedení je $U_n = 400$ kV.
 - poměry na vedení při chodu naprázdno, nakrátko a při přenosu přirozeného výkonu
 - výsledky porovnejte

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 1.6.2009

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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Ondřej Jurča

Bytem: Horní Dráhy 2046, Rožnov pod Radhoštěm 756 61

Narozen/a (datum a místo): 11.5.1987, Valašské Meziříčí

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno,

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

disertační práce

diplomová práce

bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako.....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Ustálený chod vedení 400 kV

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Ústav: Ústav elektroenergetiky

Datum obhajoby VŠKP: 16.6.2009

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v :

* hodící se zaškrtněte

- tištěné formě – počet exemplářů 2
 elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy

(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 16.6.2009

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Bibliografická citace práce:

JURČA, O. *Ustálený chod vedení 400 kV*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 65 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Chtěl bych poděkovat především mým rodičům za soustavnou podporu při mém bakalářském studiu.

Zaroveň děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Vladimíru Blažkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a za další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Poděkování také patří mé dobré kamarádce Kateřině Martinátové, která se postarala o jazykovou korektnost této práce.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

Ustálený chod vedení 400 kV

Ondřej Jurča

vedoucí: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2009

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

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

Bachelor's Thesis

Stabilized operation of the 400 kV power line

by

Ondřej Jurča

Supervisor: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

Brno University of Technology, 2009

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 začátku vedení v ustáleném chodu a při zvláštních případech chodu vedení. V závěru práce jsou shrnuty získané výsledky a závěrečné posouzení jednotlivých metod řešení z hlediska přesnosti výpočtu.

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 beginning of the line under steady running conditions and in special cases of the line operation. The conclusion of the thesis summaries the obtained results and provides final assessment of the individual methods of solution in terms of calculation accuracy.

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.....	12
SEZNAM TABULEK	13
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	14
1 ÚVOD.....	16
2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	17
3 CÍLE PRÁCE.....	18
4 HOMOGENNÍ VEDENÍ.....	19
4.1 VEDENÍ S ROVNOMĚRNĚ ROZLOŽENÝMI PARAMETRY – PŘESNÉ ŘEŠENÍ.....	19
5 NÁHRADA VEDENÍ SOUSTŘEDĚNÝMI PARAMETRY – PŘIBLIŽNÉ ŘEŠENÍ.....	25
5.1 ČLÁNEK π	26
5.2 ČLÁNEK T.....	28
5.3 ČLÁNEK Γ	30
5.4 STEINMETZŮV ČLÁNEK	31
6 ZVLÁŠTNÍ PŘÍPADY CHODU VEDENÍ.....	34
6.1 CHOD VEDENÍ NAPRÁZDNO	34
6.2 CHOD VEDENÍ NAKRÁTKO.....	35
6.3 CHOD VEDENÍ S PŘIROZENÝM VÝKONEM	36
7 OBECNÁ METODA ŘEŠENÍ SÍTÍ VVN A ZVN	38
7.1 PODMÍNKY URČITOSTI CHODU SÍTÍ VVN A ZVN.....	39
7.2 GAUSS-SEIDLOVA METODA ŘEŠENÍ ROVNIC CHODU SÍTĚ S ODBĚROVÝMI UZLY.....	41
7.3 GAUSS-SEIDLOVA METODA ŘEŠENÍ ROVNIC CHODU SÍTĚ S ODBĚROVÝMI A REGULAČNÍMI UZLY	43
8 GRAFICKÉ METODY VÝPOČTU VEDENÍ.....	44
9 PŘESNÝ VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU VEDENÍ.....	45
10 PŘIBLIŽNÝ VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU VEDENÍ.....	48
10.1 ŘEŠENÍ POMOCÍ π -ČLÁNKU	48
10.1.1 POSTUPNÉ ŘEŠENÍ.....	48
10.1.2 VÝPOČET POMOCÍ BLONDELOVÝCH KONSTANT π -ČLÁNKU	49
10.2 ŘEŠENÍ POMOCÍ T-ČLÁNKU.....	50
10.2.1 POSTUPNÉ ŘEŠENÍ.....	50
10.2.2 ŘEŠENÍ POMOCÍ BLONDELOVÝCH KONSTANT T-ČLÁNKU	52
10.3 ŘEŠENÍ POMOCÍ Γ -ČLÁNKU.....	53
10.3.1 ŘEŠENÍ POMOCÍ Γ -ČLÁNKU S PŘÍČNOU VĚTVÍ NA VSTUPU ČLÁNKU	53
10.3.2 ŘEŠENÍ POMOCÍ Γ -ČLÁNKU S PŘÍČNOU VĚTVÍ NA VÝSTUPU ČLÁNKU	55

10.4 ŘEŠENÍ POMOCÍ STEINMETZOVA ČLÁNKU.....	57
10.4.1 POSTUPNÉ ŘEŠENÍ.....	57
10.4.2 VÝPOČET POMOCÍ BLONDELOVÝCH KONSTANT	59
11 ZVLÁŠTNÍ PŘÍPADY CHODU VEDENÍ – VÝPOČET	61
11.1 CHOD VEDENÍ NAPRÁZDNO	61
11.2 CHOD VEDENÍ NAKRÁTKO	62
11.3 CHOD VEDENÍ S PŘIROZENÝM VÝKONEM	63
12 ZÁVĚR.....	66
12.1 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY A JEJICH ZHODNOCENÍ.....	66
POUŽITÁ LITERATURA	68

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr.4-1 Element vedení s rovnoměrně rozloženými parametry</i>	<i>19</i>
<i>Obr.5-1 Lineární dvojbran</i>	<i>25</i>
<i>Obr.5-2 Náhradní π-článek</i>	<i>26</i>
<i>Obr.5-3 Podrobné schéma π-článku</i>	<i>27</i>
<i>Obr.5-4 Fázorový diagram π-článku při induktivní zátěži</i>	<i>27</i>
<i>Obr.5-5 Náhradní T-článek</i>	<i>28</i>
<i>Obr.5-6 Podrobné schéma T článku.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr.5-7 Fázorový diagram T článku.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr.5-8 Náhradní Γ-článek a) s příčnou větví na vstupu b) s příčnou větví na výstupu</i>	<i>30</i>
<i>Obr.5-9 Náhradní Steinmetzův článek</i>	<i>32</i>
<i>Obr.5-10 Podrobné schéma Steinmetzova článku.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr.5-11 Fázorový diagram Steinmetzova článku.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr.6-1 Náhradní π-článek k odvození rovnic</i>	<i>34</i>
<i>Obr.6-2 Fázorový diagram π-článku při chodu naprázdno</i>	<i>35</i>
<i>Obr.6-3 Fázorový diagram π-článku při chodu nakrátko</i>	<i>36</i>
<i>Obr.7-1 a) schéma dané sítě b) schéma sítě po náhradě jednotlivých větví π-články</i>	<i>38</i>
<i>Obr.7-2 Náhrada vedení π-článkem k výpočtu ztrát</i>	<i>42</i>
<i>Obr.11-1 Náhradní schéma pro chod nakrátko</i>	<i>62</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab.12-1</i> Přehled hodnot poměrů na začátku zadaného vedení při ustáleném chodu.....	66
<i>Tab.12-2</i> Hodnoty účinníku na začátku vedení, účinnosti přenosu a ztrát činného výkonu na vedení.....	67
<i>Tab.12-3</i> Poměry na začátku vedení při zvláštních případech chodu vedení.....	67

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Jednotka
A	přenosová konstanta (Blondelova)	-
A₁	integrační konstanta	-
A₂	integrační konstanta	-
A₃	integrační konstanta	-
A₄	integrační konstanta	-
B	přenosová konstanta (Blondelova)	Ω
B_k	příčná kapacitní susceptance na jednotku délky vedení	$S.km^{-1}$
B_q	příčná kapacitní susceptance vedení	S
C	přenosová konstanta (Blondelova)	S
C_k	kapacita vedení na jednotku délky vedení	$F.km^{-1}$
D	přenosová konstanta (Blondelova)	-
G_k	konduktance vedení na jednotku délky vedení	$S.km^{-1}$
G_q	příčná konduktance vedení	S
I	elektrický proud	A
I_q	fázor proudu příčnou větví dvojbranu	A
I₁	fázor proudu na začátku vedení	A
I₁₀	fázor proudu na začátku vedení při chodu naprázdno	A
I_{1k}	fázor proudu na začátku vedení při chodu nakrátko	A
I₂	fázor proudu na konci vedení	A
I(x)	fázor proudu závislý na souřadnici x	A
L_k	indukčnost vedení na jednotku délky vedení	$H.km^{-1}$
P	činný výkon	W
R_k	rezistance vedení na jednotku délky vedení	$\Omega.km^{-1}$
R_l	podélná rezistance vedení	Ω
S₁	trojfázový komplexní výkon na začátku vedení	VA
S₂	trojfázový komplexní výkon na konci vedení	VA
S₁	trojfázový zdánlivý výkon na začátku vedení	VA
S₂	trojfázový zdánlivý výkon na konci vedení	VA
U	elektrické napětí	V
U_{f1}	fázor fázového napětí na vstupu dvojbranu	V
U_{f2}	fázor fázového napětí na výstupu dvojbranu	V
U_q	fázor fázového napětí na příčné admitanci dvojbranu	V
U₁₀	fázor napětí na začátku vedení při chodu naprázdno	V
U₁	fázor sdruženého napětí na začátku vedení	V
U₂	fázor sdruženého napětí na konci vedení	V
U(x)	fázor sdruženého napětí závislý na souřadnici x	V
U_s	sdružené napětí	V
X_k	podélná induktivní reaktance na jednotku délky vedení	$\Omega.km^{-1}$
X_l	podélná induktivní reaktance vedení	Ω
Y_k	příčná admitance vedení na jednotku délky vedení	$S.km^{-1}$
Y_q	příčná admitance vedení	S
Z₁₀	impedance vedení naprázdno	Ω

\mathbf{Z}_{1k}	impedance vedení nakrátko	Ω
\mathbf{Z}_k	podélná impedance vedení na jednotku délky vedení	$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$
\mathbf{Z}_l	podélná impedance vedení	Ω
\mathbf{Z}_v	vlnová impedance	Ω
$\cos\varphi$	účinník	-
$\cos\varphi_1$	účinník na začátku vedení	-
$\cos\varphi_2$	účinník na konci vedení	-
f	frekvence	Hz
$i(x,t)$	závislost proudu na vzdálenosti od konce vedení na čase	A
$i_1(t)$	závislost proudu na začátku vedení na čase	A
$i_2(t)$	závislost proudu na konci vedení na čase	A
j	imaginární jednotka	-
l	délka vedení	km
t	čas	s
$u(x,t)$	závislost napětí na vzdálenosti od konce vedení na čase	V
$u_1(t)$	závislost napětí na začátku vedení na čase	V
$u_2(t)$	závislost napětí na konci vedení na čase	V
v	rychlost vlny	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
x	vzdálenost od konce vedení	km
ΔP	ztráty činného výkonu	W
ΔP_{z1k}	ztráty výkonu nakrátko	W
$\Delta \mathbf{U}_l$	fázová hodnota fázoru úbytku napětí na podélné impedanci vedení	V
α	úhel vedení	°
α	činitel tlumení	km^{-1}
β	činitel fázového natočení	km^{-1}
η	účinnost přenosu výkonu vedením	%
φ	fázový posun mezi proudem a napětím	°
λ	délka vlny	m
γ	činitel šíření	km^{-1}
π	Ludolfovo číslo	1
ω	kruhová frekvence	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
∂	znak parciální derivace	-
\angle	vektor	-

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).

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

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2. \quad (1.1)$$

Jelikož je přenášený činný výkon závislý na napětí, proudu a účinníku

$$P = \sqrt{3} \cdot U_s \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (1.2)$$

s výhodou se využívá maximálního možného napětí při stejné velikosti přenášeného výkonu. V ČR je nejvyšší napětová hladina právě 400 kV. Pro naši zemi je to postačující, ovšem pro velké země, kde délka vedení může dosahovat až 1000 km, se používají i vyšší napětové hladiny, nejčastěji 750 kV.

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 tyto 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.

V níže uvedených kapitolách zavedeme následující značení veličin:

- veškeré fázory a komplexní veličiny budou uvedeny tučným písmem
- sdružené hodnoty napětí nebudou značeny, fázové hodnoty budou mít v indexu písmeno „f“.

2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

V naší republice se používá vedení v napěťových hladinách velmi vysokého napětí 110 kV, 220 kV a zvláště vysokého napětí 400 kV. Vedení s napěťovými hladinami 220 kV a 400 kV se výhradně používají v přenosové soustavě. Tato soustava je také často nazývána „páteřní“. Slouží k vyvedení výkonu z velkých systémových elektráren, k napájení distribučních sítí elektrinou, které ji dále rozvádějí až ke koncovým spotřebitelům a k mezinárodnímu propojení Evropy.

Páteřní soustava je v dnešní době tvořena hlavně vedeními 400 kV. Výstavba vedení 220 kV byla zastavena v 70. letech minulého století a nyní tato vedení plní úlohu záložních a doplňkových vedení. Historicky nejstarší soustavy 110 kV v 70. letech postupně převzaly úlohu uzlově napájených distribučních sítí.

3 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.

V druhé části práce budeme aplikovat teoretické poznatky z první části práce na konkrétním vedení o daných parametrech a charakteristice odběru.

V závěru pak zhodnotíme získané výsledky a porovnáme jednotlivé metody řešení vvn a zvn z hlediska přesnosti.

4 HOMOGENNÍ VEDENÍ

Vedení vvn a zvn modelujeme obvody se soustředěnými nebo rozloženými parametry. Rozhodnutí o tom, který způsob je vhodné použít, závisí na frekvenci, rychlosti šíření vln obvodem a na geometrickém rozměru elektrické soustavy [3].

Při harmonicky proměnném elektromagnetickém poli je délka vlny $\lambda = v/f$. Jestliže rychlost šíření vln na venkovním vedení je $v \approx 3 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ a použitá frekvence 50 Hz , bude délka vlny přibližně 6000 km [3].

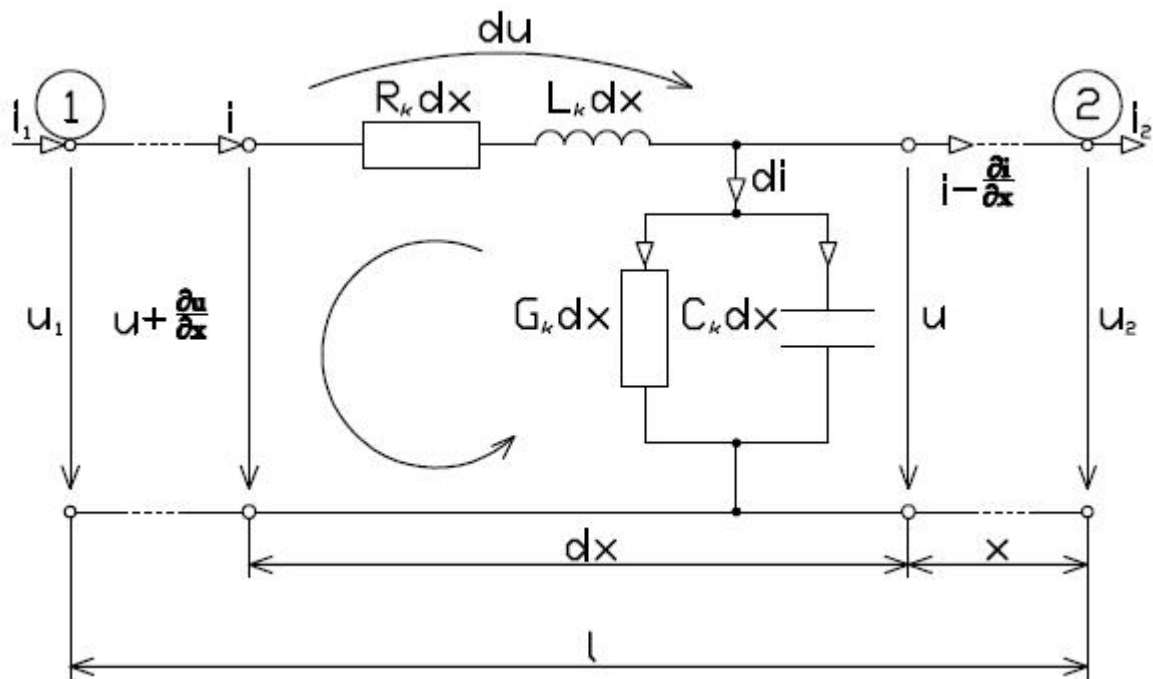
Elektrická vedení jsou jednorozměrovým obvodem, kde se délka vedení pohybuje od desítek metrů až po řádově tisíce kilometrů. Náhrada elektrických vedení *soustředěnými parametry* je možná pouze tehdy, když délka tohoto vedení je malá v porovnání s délkou vlny. A naopak vedení, jehož délka je srovnatelná s délkou vlny a projevuje se konečná rychlost šíření elektromagnetického pole, je nutné nahrazovat *rozloženými parametry* [3].

Jak už bylo výše zmíněno, délky vedení vvn a zvn jsou malé (např. v ČR maximální délka vedení 400 kV je $283,7 \text{ km}$ [7]) oproti délce vlny, proto se vlnové procesy v ustáleném stavu vedení neuvažují.

V této kapitole se budeme zabývat přesným řešením ustáleného chodu vedení za předpokladu, že vedení bude s rovnoměrně rozloženými parametry. V dalších kapitolách pak bude uvedeno přibližné řešení pomocí obvodů se soustředěnými parametry.

4.1 Vedení s rovnoměrně rozloženými parametry – přesné řešení

Při odvození rovnic vedení s rovnoměrně rozloženými parametry uvažujeme symetrické trojfázové vedení napájené symetrickým zdrojem napětí a zatížené symetrickou zátěží. Za tohoto předpokladu, na takto definovaném vedení ve vzdálenosti x od konce vedení, vymežíme elementární úsek o délce dx (Obr.4-1).



Obr.4-1 Element vedení s rovnoměrně rozloženými parametry

Pokud linearizujeme funkce napětí $u(x,t)$ a proudu $i(x,t)$ v okolí bodu x , pak lze podle Kirchhoffových zákonů psát pro napětí a proudy v elementu délky dx tyto rovnice [1].

$$\left(u(x,t) + \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} dx \right) - u(x,t) = R_k i(x,t) dx + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} dx \quad (4.1)$$

$$i(x,t) - \left(i(x,t) - \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} dx \right) = G_k u(x,t) dx + C_k \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} dx \quad (4.2)$$

Po úpravách

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = R_k i(x,t) + L_k \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = G_k u(x,t) + C_k \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \quad (4.4)$$

Rovnice (4.3) a (4.4) jsou základní parciální diferenciální rovnice homogenního vedení, které vyjadřují časovou (t) a délkovou (x) závislost napětí a proudu [3].

Obě rovnice derivujeme podle x a t a separujeme neznámé funkce u a i . Dostáváme následující parciální diferenciální rovnice pro proud i a napětí u

$$\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x^2} = G_k \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + C_k \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t}, \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x \partial t} = G_k \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + C_k \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}, \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = R_k \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + L_k \frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x \partial t}, \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t} = R_k \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} + L_k \frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial t^2}. \quad (4.8)$$

Po dosazení smíšených derivací z (4.6) a (4.8) do vztahů (4.5) a (4.7) a po provedení dalších formálních úprav dospíváme k následující dvojici rovnic

$$\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x^2} = G_k R_k i(x,t) + (G_k L_k + R_k C_k) \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} + C_k L_k \frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial t^2}, \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = G_k R_k u(x,t) + (G_k L_k + R_k C_k) \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} + C_k L_k \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}. \quad (4.10)$$

Jedná se o lineární homogenní parciální diferenciální rovnice druhého řádu (hyperbolického typu). Jsou platné jak pro $i(x,t)$, tak i pro $u(x,t)$ [3].

Tyto rovnice se též nazývají **Telegrafní rovnice**. Mají historický význam a jejich odvození provedl jako první skotský fyzik William Thomson.

Diferenciální rovnice homogenního vedení (4.3) a (4.4) platí obecně pro libovolný průběh napětí a proudů [3]. Když uvážíme, že za ustáleného chodu přenosové soustavy, po odeznění

všech přechodných jevů se proud a napětí mění s časem harmonicky (zanedbáváme vliv vyšších harmonických). Potom v každém bodě libovolné souřadnice bude průběh napětí a proudu harmonický.

$$u(x, t) = \sqrt{2}U(x)\sin(\omega t + \varphi_u) \quad (4.11)$$

$$i(x, t) = \sqrt{2}I(x)\sin(\omega t + \varphi_i) \quad (4.12)$$

Rovnice (4.11) a (4.12) dvakrát zderivujeme podle času (derivaci provedeme pouze pro proud, pro napětí platí obdobné vztahy) a dostaneme po první derivaci

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial t} = \sqrt{2}\omega I(x)\sin\left(\omega t + \varphi_i + \frac{\pi}{2}\right), \quad (4.13)$$

po druhé derivaci

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2} = \sqrt{2}\omega^2 I(x)\sin(\omega t + \varphi_i + \pi). \quad (4.14)$$

Použitím zápisu symbolicko-komplexního počtu potom rovnice (4.12), (4.13) a (4.14) přejdou na tvar

$$i(x, t) = \operatorname{Re}\left\{\sqrt{2}I(x)e^{j(\omega t + \varphi_i)}\right\} = \operatorname{Re}\left\{\sqrt{2}\mathbf{I}(x)e^{j\omega t}\right\} \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial t} = \operatorname{Re}\left\{\sqrt{2}j\omega I(x)e^{j(\omega t + \varphi_i)}\right\} = \operatorname{Re}\left\{\sqrt{2}j\omega\mathbf{I}(x)e^{j\omega t}\right\} \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2} = \operatorname{Re}\left\{-\sqrt{2}\omega^2 I(x)e^{j(\omega t + \varphi_i)}\right\} = \operatorname{Re}\left\{-\sqrt{2}\omega^2\mathbf{I}(x)e^{j\omega t}\right\} \quad (4.17)$$

kde $\mathbf{I}(x) = I(x) \cdot e^{j\varphi}$.

Za těchto omezujících podmínek lze telegrafní rovnice přepsat do symbolicko-komplexního tvaru, čímž se značně zjednoduší.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \mathbf{I}(x)}{\partial x^2} &= G_k R_k \mathbf{I}(x) + (G_k L_k + R_k C_k) j\omega \mathbf{I}(x) - C_k L_k \omega^2 \mathbf{I}(x) = \\ &= (R_k + jX_k)(G_k + jB_k) \mathbf{I}(x) = \mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k \mathbf{I}(x) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Pro druhou derivaci harmonického napětí podle vzdálenosti x , od konce vedení, můžeme psát obdobný vztah

$$\frac{\partial^2 \mathbf{U}(x)}{\partial x^2} = (R_k + jX_k)(G_k + jB_k) \mathbf{U}(x) = \mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k \mathbf{U}(x). \quad (4.19)$$

V rovnicích (4.18) a (4.19) značí X_k podélnou induktivní reaktanci na jednotku délky vedení a B_k příčnou kapacitní susceptanci na jednotku délky vedení, pro harmonický průběh napětí a proudu s kruhovou frekvencí $\omega = 2\pi f$.

Rovnice (4.18) a (4.19) jsou speciálním tvarem dříve odvozených rovnic (4.9) a (4.10). Platí pro harmonické průběhy napětí a proudu. Jsou to homogenní diferenciální rovnice druhého řádu s konstantními koeficienty. Obsahují pouze derivace podle souřadnice x . Časové průběhy napětí a proudu jsou známy, protože řešíme ustálený stav.

Pro řešení těchto diferenciálních rovnic lze použít substituci $\mathbf{I}(x) = e^{\gamma x}$ resp. $\mathbf{U}(x) = e^{\gamma x}$, jejíž derivováním a dosazením do rovnice (4.18) resp. (4.19) získáme charakteristickou rovnicí [3]

$$\frac{d^2 \mathbf{I}(x)}{dx^2} = \gamma^2 e^{\gamma x} = \mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k e^{\gamma x} \quad \text{resp.} \quad \frac{d^2 \mathbf{U}(x)}{dx^2} = \gamma^2 e^{\gamma x} = \mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k e^{\gamma x} \quad (4.20)$$

a po úpravách dostaneme

$$\gamma^2 - \mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k = 0. \quad (4.21)$$

Kořeny charakteristické rovnice (4.21) tedy jsou

$$\gamma_{1,2} = \pm \sqrt{\mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k} = \pm \sqrt{(R_k + jX_k)(G_k + jB_k)}. \quad (4.22)$$

Činitel šíření $\gamma = \alpha + j\beta$ je obecně komplexní konstanta, která charakterizuje vlnové poměry na daném vedení a je závislá právě na parametrech vedení. Její reálná část α je tzv. činitel tlumení. Vyjadřuje útlum amplitudy vlny na jednotku délky vedení. Imaginární složka činitele šíření je tzv. činitel fázového natočení a vyjadřuje fázový posuv vlny na jednotku délky vedení.

Obecné řešení diferenciálních rovnic (4.18) a (4.19) je

$$\mathbf{I}(x) = \mathbf{A}_1 e^{\gamma x} + \mathbf{A}_2 e^{-\gamma x} \quad (4.23)$$

$$\mathbf{U}(x) = \mathbf{A}_3 e^{\gamma x} + \mathbf{A}_4 e^{-\gamma x} \quad (4.24)$$

Z okrajových podmínek, resp. z proudu a napětí na konci vedení, stanovíme fázory integračních konstant \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_2 , \mathbf{A}_3 a \mathbf{A}_4 .

Určíme si výchozí podmínky na konci přenosu

$$\mathbf{U}(x=0) = \mathbf{U}_2 \quad \mathbf{I}(x=0) = \mathbf{I}_2 \quad (4.25)$$

Integrační konstanty \mathbf{A}_1 až \mathbf{A}_4 v rovnicích (4.23) a (4.24) jsme schopni zredukovat na dvě. Lze dokázat, že hledané funkce proudu $\mathbf{I}(x)$ a napětí $\mathbf{U}(x)$ jsou na sobě závislé. Po přepsání rovnice (4.4) do symbolicko-komplexního tvaru dostaneme vztah

$$\frac{\partial \mathbf{I}(x)}{\partial x} = \mathbf{Y}_k \mathbf{U}(x). \quad (4.26)$$

Provedeme derivaci rovnice (4.23) podle x

$$\frac{\partial \mathbf{I}(x)}{\partial x} = \gamma (\mathbf{A}_1 e^{\gamma x} - \mathbf{A}_2 e^{-\gamma x}). \quad (4.27)$$

Rovnici (4.27) nyní dosadíme do vztahu (4.26) a po úpravách dostaneme pro napětí

$$\mathbf{U}(x) = \frac{\gamma}{\mathbf{Y}_k} (\mathbf{A}_1 e^{\gamma x} - \mathbf{A}_2 e^{-\gamma x}) = \sqrt{\frac{\mathbf{Z}_k}{\mathbf{Y}_k}} (\mathbf{A}_1 e^{\gamma x} - \mathbf{A}_2 e^{-\gamma x}) = \mathbf{Z}_v \mathbf{A}_1 e^{\gamma x} - \mathbf{Z}_v \mathbf{A}_2 e^{-\gamma x}. \quad (4.28)$$

Porovnáním rovnic (4.28) a (4.24) získáme následující vztahy mezi integračními konstantami \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_3 a \mathbf{A}_2 , \mathbf{A}_4

$$\mathbf{A}_3 = \mathbf{Z}_v \mathbf{A}_1 \quad \mathbf{A}_4 = -\mathbf{Z}_v \mathbf{A}_2 \quad (4.29)$$

Z výše uvedeného vyplývá, že pro stanovení integračních konstant stačí zadat dvě okrajové podmínky. V rovnicích (4.27), (4.28) a (4.29) jsme zavedli novou veličinu. Jedná se o vlnovou impedanci

$$\mathbf{Z}_v = \sqrt{\frac{\mathbf{Z}_k}{\mathbf{Y}_k}}. \quad (4.30)$$

Podobně jako činitel šíření charakterizuje vedení po stránce vlnových pochodů. Tyto dvě komplexní konstanty jsou určující veličiny pro chod vedení. Jsou nazývány sekundárními parametry vedení.

Dosazením okrajových podmínek do obecného řešení (4.23) a (4.24) je

$$\mathbf{I}_2 = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 \quad (4.31)$$

$$\mathbf{U}_2 = \mathbf{Z}_v \mathbf{A}_1 - \mathbf{Z}_v \mathbf{A}_2. \quad (4.32)$$

Odtud jsou integrační konstanty

$$\mathbf{A}_1 = \frac{\mathbf{U}_2 + \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_v}{2\mathbf{Z}_v}, \quad \mathbf{A}_2 = \frac{\mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_v - \mathbf{U}_2}{2\mathbf{Z}_v}. \quad (4.33)$$

Zpětným dosazením získaných integračních konstant (4.33) do obecného řešení diferenciálních rovnic (4.23) a (4.24) dostaneme hledané fázory napětí $\mathbf{U}(x)$ a proudu $\mathbf{I}(x)$ jako funkce vzdálenosti x od konce vedení.

$$\begin{aligned} \mathbf{I}(x) &= \frac{\mathbf{U}_2 + \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_v}{2\mathbf{Z}_v} e^{\gamma x} + \frac{\mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_v - \mathbf{U}_2}{2\mathbf{Z}_v} e^{-\gamma x} = \mathbf{U}_2 \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \frac{1}{\mathbf{Z}_v} + \mathbf{I}_2 \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} = \\ &= \frac{\mathbf{U}_2}{\mathbf{Z}_v} \sinh \gamma x + \mathbf{I}_2 \cosh \gamma x = \mathbf{U}_2 \mathbf{C} + \mathbf{I}_2 \mathbf{A} \end{aligned} \quad (4.34)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U}(x) &= \frac{\mathbf{U}_2 + \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_v}{2} e^{\gamma x} - \frac{\mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_v - \mathbf{U}_2}{2} e^{-\gamma x} = \mathbf{U}_2 \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} + \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_v \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} = \\ &= \mathbf{U}_2 \cosh \gamma x + \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_v \sinh \gamma x = \mathbf{U}_2 \mathbf{A} + \mathbf{I}_2 \mathbf{B} \end{aligned} \quad (4.35)$$

Pomocí rovnic (4.34) a (4.35) jsme schopni vypočítat fázory napětí a proudu v jaké koliv vzdálenosti x od konce vedení. Zpravidla ale potřebujeme stanovit napětí a proudy na začátku vedení \mathbf{U}_1 a \mathbf{I}_1 při známých hodnotách fázorů na konci vedení \mathbf{U}_2 a \mathbf{I}_2 , u odběratele. Poměry na začátku vedení lze vypočítat použitím těchto rovnic dosazením celkové délky vedení l za proměnou x a vyčíslením hyperbolického sinu a kosinu. Vyčíslení hyperbolických funkcí provedeme součtem členů Taylorova rozvoje těchto funkcí

$$\cosh \gamma l = 1 + \frac{(\gamma l)^2}{2!} + \frac{(\gamma l)^4}{4!} + \dots \quad (4.36)$$

$$\sinh \gamma l = \gamma l + \frac{(\gamma l)^3}{3!} + \frac{(\gamma l)^5}{5!} + \dots \quad (4.37)$$

Použitím vztahu pro vlnovou impedanci \mathbf{Z}_v (4.30), činitele šíření $\gamma = \sqrt{\mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k}$ a součtem Taylorova rozvoje hyperbolického sinu a kosinu (4.36) a (4.37) v rovnicích (4.34) a (4.35) je zřejmá závislost přenosových konstant na komplexních parametrech \mathbf{Z}_k a \mathbf{Y}_k a délce vedení l .

$$\mathbf{A} = \cosh \sqrt{\mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k} l = 1 + \frac{\mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k l^2}{2} + \frac{(\mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k)^2 l^4}{24} + \dots \quad (4.38)$$

$$\mathbf{B} = \sqrt{\frac{\mathbf{Z}_k}{\mathbf{Y}_k}} \sinh \sqrt{\mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k} l = \mathbf{Z}_k l \left(1 + \frac{\mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k l^2}{6} + \frac{(\mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k)^2 l^4}{120} + \dots \right) \quad (4.39)$$

$$\mathbf{C} = \sqrt{\frac{\mathbf{Y}_k}{\mathbf{Z}_k}} \sinh \sqrt{\mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k} l = \mathbf{Y}_k l \left(1 + \frac{\mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k l^2}{6} + \frac{(\mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k)^2 l^4}{120} + \dots \right) \quad (4.40)$$

Není potřeba sčítat všechny členy Taylorova rozvoje hyperbolických funkcí. Dostatečnou přesnost výpočtu nám zaručí součet prvních tří členů rozvoje.

Vztah mezi přenosovými konstantami je následující

$$\mathbf{A}^2 - \mathbf{B}\mathbf{C} = 1. \quad (4.41)$$

Vyplývá to z matematického vztahu

$$\cosh^2 x - \sinh^2 x = 1. \quad (4.42)$$

Přenosové konstanty \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} lze také stanovit měřením impedance naprázdno a nakrátko daného vedení [1].

Při stavu naprázdno ($\mathbf{I}_2 = 0$) a nakrátko ($\mathbf{U}_2 = 0$) lze impedance naprázdno a nakrátko vyjádřit pomocí přenosových konstant [1]

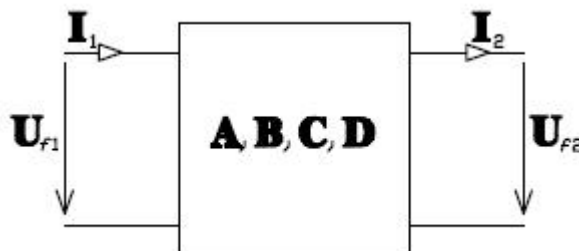
$$\mathbf{Z}_{10} = \frac{\mathbf{U}_{10}}{\mathbf{I}_{10}} = \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{C}}, \quad (4.43)$$

$$\mathbf{Z}_{1k} = \frac{\mathbf{U}_{1k}}{\mathbf{I}_{1k}} = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{A}}. \quad (4.44)$$

Změříme-li impedance \mathbf{Z}_{10} a \mathbf{Z}_{1k} a uvážíme-li, že přenosové konstanty jsou vázány vztahem (4.41), pak pomocí vztahů (4.41), (4.43) a (4.44) lze tyto konstanty vyčíslit [1].

5 NÁHRADA VEDENÍ SOUSTŘEDĚNÝMI PARAMETRY – PŘIBLIŽNÉ ŘEŠENÍ

Jestliže nás nezajímají přesné poměry prvků uvnitř soustavy (transformátory, vedení apod.), lze s dostatečnou přesností nahradit vedení lineárními dvojbranami, které jsou charakterizovány veličinami na vstupních svorkách, výstupních svorkách a svou přenosovou schopností, resp. přenosovými konstantami. Obecné schéma lineárního dvojbranu je uvedeno na obrázku (Obr.5-1).



Obr.5-1 Lineární dvojbran

Pro výpočty poměrů na začátku a na konci vedení nám tedy stačí zjistit vztahy mezi charakteristickými veličinami lineárního dvojbranu.

Vztahy mezi fázory vstupních a výstupních proudů a napětí popisují v maticovém zápisu rovnice s postupnou kaskádní maticí

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{f1} \\ \mathbf{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{f2} \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

a rovnice se zpětnou kaskádní maticí

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{f2} \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D} & -\mathbf{B} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{A} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{f1} \\ \mathbf{I}_1 \end{bmatrix}, \quad (5.2)$$

kde \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} jsou přenosové konstanty, tzv. Blondelovy.

Tyto konstanty jsou vázány vztahem

$$\mathbf{AD} - \mathbf{BC} = 1. \quad (5.3)$$

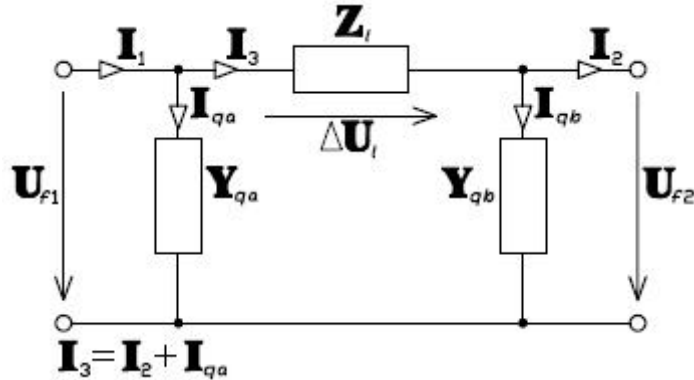
Je-li dvojbran souměrný, tzn. $\mathbf{A} = \mathbf{D}$ přejde vztah (5.3) do tvaru

$$\mathbf{A}^2 - \mathbf{BC} = 1. \quad (5.4)$$

V této kapitole se zmíníme o čtyřech typech dvojbranů používaných v energetice jako náhradní obvody pro homogenní vedení. Jsou to články π , \mathbf{T} , Γ a **Steinmetzův článek**. Největší význam pro energetiku má π -článek.

5.1 Článek π

Jak už bylo řečeno, π -článek má v energetice zásadní význam. Dají se s ním dostatečně přesně nahradit vedení až do délky 400 km. Je složen z podélné větve, ve které je podélná impedance Z_l a ze dvou větví příčných, které obsahují příčné admittance Y_{qa} a Y_{qb} na vstupu a výstupu článku. Schéma π -článku je na obrázku (Obr.5-2).



Obr.5-2 Náhradní π -článek

Je-li článek symetrický, potom platí $Y_{qa} = Y_{qb} = 0,5Y_q$. Pro nesymetrický článek analogicky platí $Y_{qa} \neq Y_{qb}$. Z Ohmova zákona plynou pro proudy příčnými větvemi následující vztahy

$$I_{q1} = U_{f1} \cdot Y_{qa} \quad \text{a} \quad I_{q2} = U_{f2} \cdot Y_{qb} \quad (5.5)$$

Aplikací druhého Kirchhoffova zákona pro napětí ve smyčce získáme vztah

$$-U_{f1} + Z_l(I_2 + Y_{qb} \cdot U_{f2}) + U_{f2} = 0, \quad (5.6)$$

po úpravách pro U_{f1} tedy platí vztah

$$U_{f1} = (1 + Z_l \cdot Y_{qb})U_{f2} + Z_l \cdot I_2. \quad (5.7)$$

Analogicky pro proudy v jednotlivých uzlech, podle prvního Kirchhoffova zákona dostáváme

$$-I_1 + Y_{qa} \cdot U_{f1} + Y_{qb} \cdot U_{f2} + I_2 = 0. \quad (5.8)$$

Dosazením vztahu (5.8) do rovnice (5.7), po provedení úprav, dostáváme vztah

$$I_1 = (Y_{qa} + Y_{qb} + Y_{qa} \cdot Y_{qb} \cdot Z_l)U_{f2} + (1 + Z_l \cdot Y_{qa})I_2. \quad (5.9)$$

Porovnáme-li rovnice (5.7) a (5.9) s rovnicemi (5.1), dostaneme pro přenosové konstanty nesymetrického π -článku následující vztahy

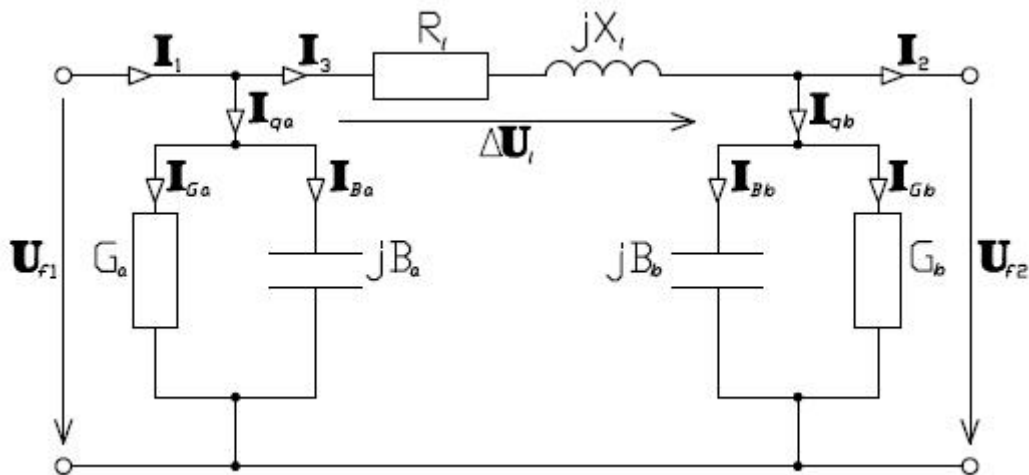
$$\begin{aligned} \mathbf{A}_\pi &= 1 + Z_l \cdot Y_{qb} & \mathbf{B}_\pi &= Z_l \\ \mathbf{C}_\pi &= Y_{qa} + Y_{qb} + Y_{qa} \cdot Y_{qb} \cdot Z_l & \mathbf{D}_\pi &= 1 + Z_l \cdot Y_{qa} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Pro symetrický π článek bude platit

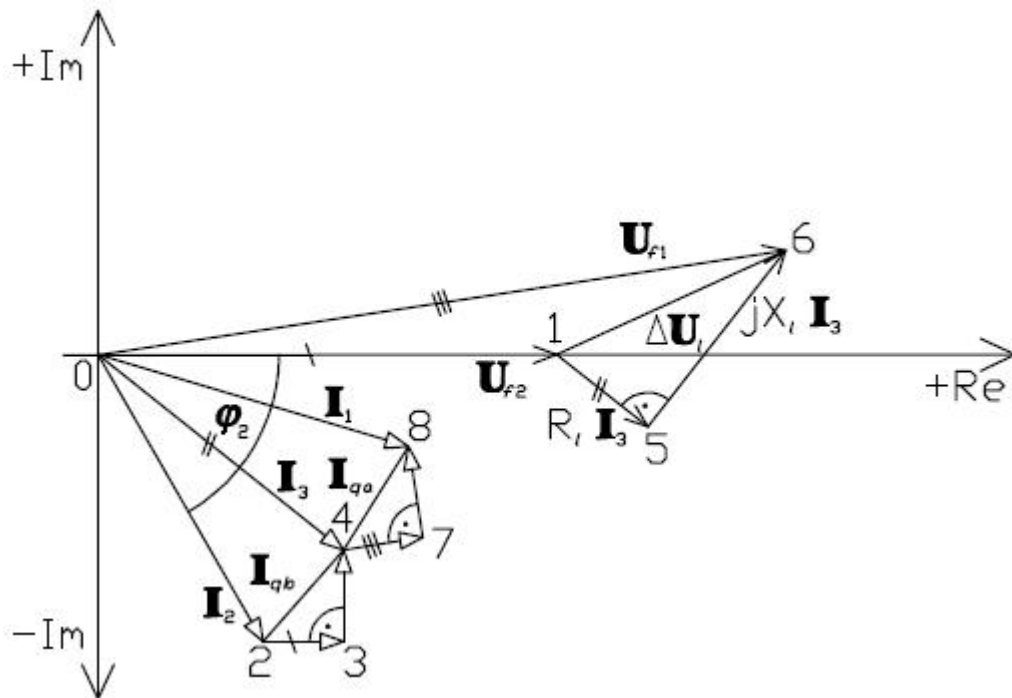
$$\begin{aligned} Y_{qa} &= Y_{qb} = \frac{1}{2} Y_q & \mathbf{A}_\pi &= \mathbf{D}_\pi = 1 + \frac{Y_q \cdot Z_l}{2} \\ \mathbf{B}_\pi &= Z_l & \mathbf{C}_\pi &= Y_q + \frac{Z_l \cdot Y_q^2}{4} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Odvozené rovnice (5.10) a (5.11) jsou aparát pro přímý výpočet poměrů na vstupu článku. Mimo tyto rovnice můžeme použít postupné řešení, nebo řešení pomocí fázorového diagramu. Dále bude popsán postup při konstrukci fázorového diagramu. Postupným řešením se nebudeme dopodrobna zabývat, protože samotné sestavování fázorového diagramu vychází z postupného řešení.

Řekněme, že článek π je dán schématem na obrázku (Obr.5-3). Na výstupní svorku 2 připojíme zátěž inдукtivního charakteru. Na této zátěži budeme mít napětí U_2 a bude jí protékat proud I_2 . Za takto stanovených podmínek můžeme přejít k sestavování fázorového diagramu (Obr.5-4).



Obr.5-3 Podrobné schéma π -článku



Obr.5-4 Fázorový diagram π -článku při indukční zátěži

Fázorový diagram budeme kreslit následujícím způsobem. Napětí na výstupu článku U_2 vyneseme do reálné osy (úsečka 01). Víme, že při uvažování indukční zátěže článku bude proud I_2 (úsečka 02) ležet ve čtvrtém kvadrantu a bude posunut oproti napětí U_2 o úhel φ_2 .

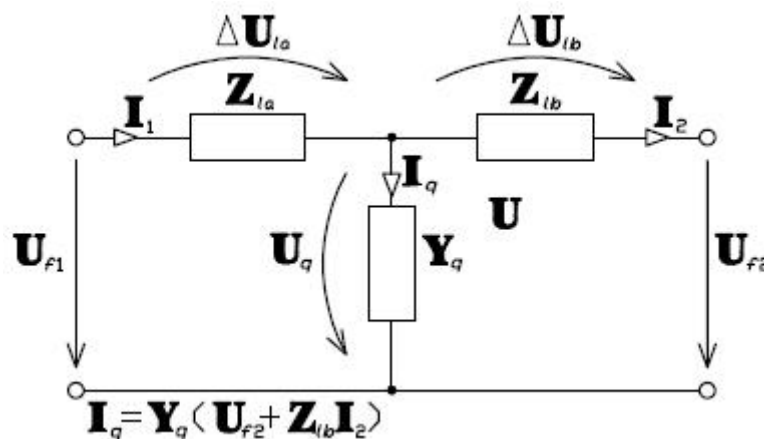
Druhou příčnou větví protéká proud \mathbf{I}_{qb} , který je součtem proudu \mathbf{I}_{Gb} (úsečka 23) na příčné konduktanci a \mathbf{I}_{Bb} (úsečka 34) na příčné kapacitní susceptanci. Proud \mathbf{I}_{Gb} je roven součinu fázoru napětí \mathbf{U}_{f2} a konduktance G_b . Na konduktanci nedochází k žádnému fázovému posunu, z čehož plyne, že proud \mathbf{I}_{Gb} je rovnoběžný s fázorem napětí \mathbf{U}_{f2} . Naproti tomu proud procházející kapacitní susceptancí jB_b , jenž je dán součinem kapacitní susceptance B_b a napětí \mathbf{U}_{f2} , předbíhá toto napětí o 90° . Takže platí, že úsečka 34 je kolmá na úsečku 23.

Z prvního Kirchhoffova zákona plyne, že proud tekoucí podélnou impedancí \mathbf{I}_3 (úsečka 04) je roven součtu proudů \mathbf{I}_2 a \mathbf{I}_{qb} . Tento proud vytváří na podélné impedanci úbytek napětí $\Delta\mathbf{U}_l$ (úsečka 16), který je součtem úbytků napětí na podélné rezistanci, jenž je dán součinem $R_l\mathbf{I}_3$ (úsečka 15), a na podélné reaktanci, což je součin $jX_l\mathbf{I}_3$ (úsečka 56). Na podélné rezistanci R_l nedochází k fázovému posunu, proto je úbytek napětí (úsečka 15) rovnoběžný s proudem \mathbf{I}_3 . Na podélné reaktanci X_l dochází k posunutí úbytku napětí o 90° před proud \mathbf{I}_3 . Z čehož plyne, že úsečka (úsečka 56) je kolmá na úsečku (úsečka 16).

Sečtením napětí \mathbf{U}_{f2} s úbytkem napětí na podélné impedanci $\Delta\mathbf{U}_l$, dostáváme napětí na vstupu článku \mathbf{U}_{f1} (úsečka 06). Dále víme, že první příčnou větví protéká proud \mathbf{I}_{qa} . Tento proud je opět dán součtem proudu protékajícího konduktancí \mathbf{I}_{Ga} (úsečka 47) a proudu procházejícího kapacitní susceptancí \mathbf{I}_{Ba} (úsečka 78). Proud \mathbf{I}_{Ga} je z již známých důvodů rovnoběžný s napětím \mathbf{U}_{f1} a proud \mathbf{I}_{Ba} je na něj kolmý. Proud na vstupu článku \mathbf{I}_1 (úsečka 08) je potom dán součtem fázorů proudů \mathbf{I}_3 a \mathbf{I}_{qa} .

5.2 Článek T

T-článek je složen ze dvou podélných impedancí \mathbf{Z}_{la} a \mathbf{Z}_{lb} a z jedné příčné admitance \mathbf{Y}_q . Jeho schéma je na obrázku (Obr.5-5). V elektroenergetice je méně vhodný pro náhradu vedení než π -článek. Zavádí totiž do obvodu další uzel. Dají se s ním nahradit vedení maximálně do délky 300 km u venkovních a do 100 km u kabelových vedení. Nejčastěji se používá jako náhradní obvod pro dvouvinutové transformátory.



Obr.5-5 Náhradní T-článek

Je-li článek symetrický, potom platí $\mathbf{Z}_{la} = \mathbf{Z}_{lb} = 0,5\mathbf{Z}_l$. Není-li symetrický $\mathbf{Z}_{la} \neq \mathbf{Z}_{lb}$. Z platnosti Ohmova zákona plyne vztah pro proud příčnou větví

$$\mathbf{I}_q = \mathbf{Y}_q (\mathbf{U}_{f2} + \mathbf{Z}_{lb} \cdot \mathbf{I}_2). \quad (5.12)$$

Podle prvního Kirchhoffova zákona a po dosazení za \mathbf{I}_q ze vztahu (5.12) můžeme psát pro proudy v T-článku následující rovnici

$$-\mathbf{I}_1 + \mathbf{Y}_q (\mathbf{U}_{f2} + \mathbf{I}_2 \cdot \mathbf{Z}_{lb}) + \mathbf{I}_2 = 0. \quad (5.13)$$

Po upravení dostaneme

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{Y}_q \cdot \mathbf{U}_{f2} + (\mathbf{Z}_{lb} \cdot \mathbf{Y}_q + 1) \mathbf{I}_2. \quad (5.14)$$

Použitím druhého Kirchhoffova zákona získáme následující rovnici pro napětí článku

$$-\mathbf{U}_{f1} + \mathbf{I}_1 \cdot \mathbf{Z}_{la} + \mathbf{I}_2 \cdot \mathbf{Z}_{lb} + \mathbf{U}_{f2} = 0 \quad (5.15)$$

a po provedení patřičných úprav dostaneme

$$\mathbf{U}_{f1} = (1 + \mathbf{Z}_{la} \cdot \mathbf{Y}_q) \mathbf{U}_{f2} + (\mathbf{Z}_{la} + \mathbf{Z}_{lb} + \mathbf{Z}_{la} \cdot \mathbf{Z}_{lb} \cdot \mathbf{Y}_q) \mathbf{I}_2. \quad (5.16)$$

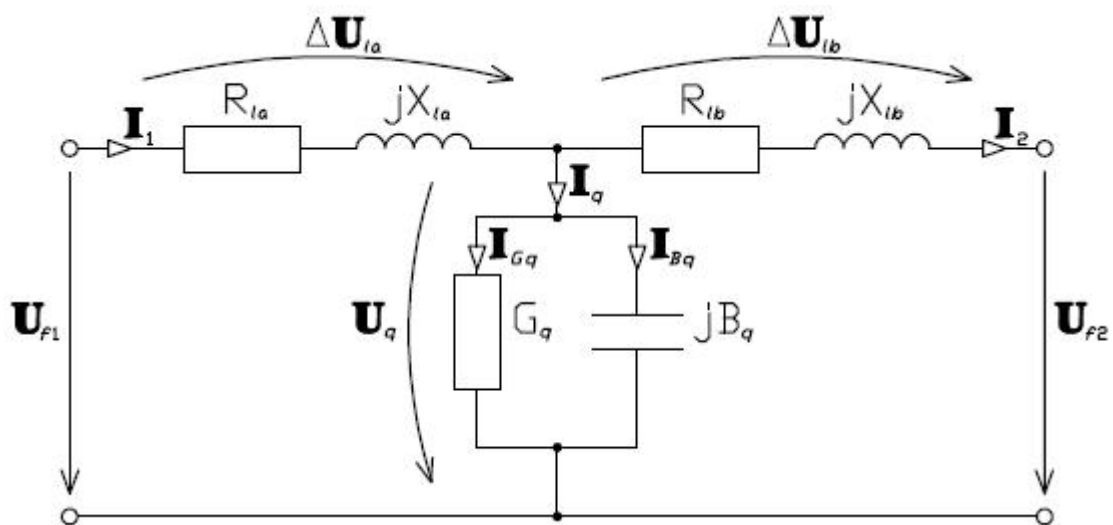
Porovnáním rovnic (5.14) a (5.16) s rovnicemi (5.1) dostaneme vztahy pro přenosové konstanty. Pro nesymetrický článek T platí

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_T &= 1 + \mathbf{Z}_{la} \cdot \mathbf{Y}_q & \mathbf{B}_T &= \mathbf{Z}_{la} + \mathbf{Z}_{lb} + \mathbf{Z}_{la} \cdot \mathbf{Z}_{lb} \cdot \mathbf{Y}_q \\ \mathbf{C}_T &= \mathbf{Y}_q & \mathbf{D}_T &= 1 + \mathbf{Z}_{lb} \cdot \mathbf{Y}_q \end{aligned} \quad (5.17)$$

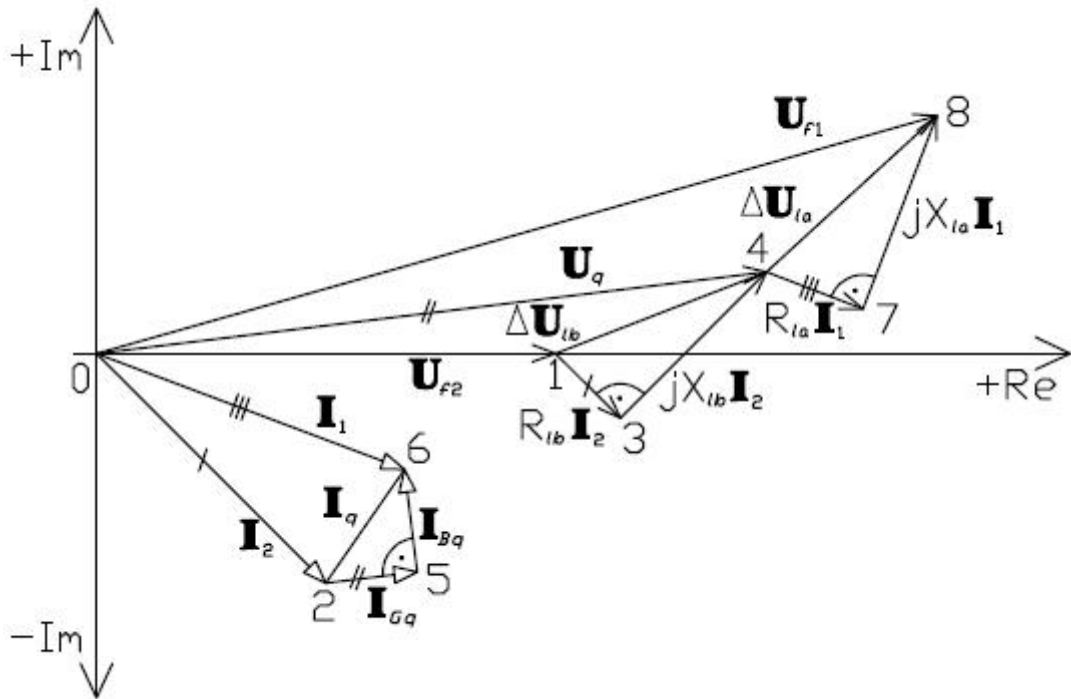
Pro symetrický článek bude analogicky platit

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{la} &= \mathbf{Z}_{lb} = \frac{1}{2} \mathbf{Z}_l & \mathbf{A}_T &= \mathbf{D}_T = 1 + \frac{\mathbf{Z}_l \cdot \mathbf{Y}_q}{2} \\ \mathbf{B}_T &= \mathbf{Z}_l + \frac{\mathbf{Z}_l^2 \cdot \mathbf{Y}_q}{4} & \mathbf{C}_T &= \mathbf{Y}_q \end{aligned} \quad (5.18)$$

Na obrázku (Obr.5-6) je podrobné schéma článku T. Na výstupní svorky připojíme zátěž inductivního charakteru, na které dostaneme napětí \mathbf{U}_{f2} a bude jí protékat proud \mathbf{I}_2 . Obdobným způsobem jako byl popsán u π -článku sestrojíme fázorový diagram (Obr.5-7).



Obr.5-6 Podrobné schéma T článku

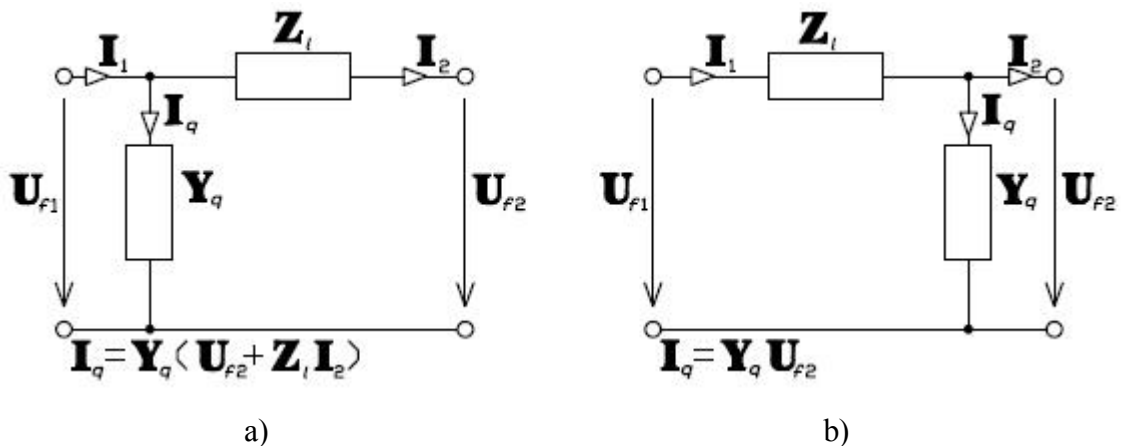


Obr.5-7 Fázorový diagram T článku

5.3 Článek Γ

Obsahuje pouze jednu podélnou impedanci Z_l a jednu příčnou admitanci Y_q . Může se vyskytovat ve dvou provedeních. S příčnou admitancí na vstupu článku a nebo s příčnou admitancí na výstupu článku.

U dlouhých vedení nemá moc velké uplatnění. Spíše se používá pro vedení kratších vzdáleností (venkovní vedení do 100 km, kabelové vedení do 30 km). V elektroenergetice se často používá jako náhradní schéma dvouvinuťových transformátorů. Speciálním využitím je při parametrické kompenzaci současně podélné a příčné.



Obr.5-8 Náhradní Γ -článek a) s příčnou větví na vstupu b) s příčnou větví na výstupu

Pokud je příčný prvek na vstupu článku, dostáváme z prvního a druhého Kirchhoffova zákona následující rovnice pro proudy a napětí v obvodu.

$$-I_1 + Y_q \cdot U_{f1} + I_2 = 0 \tag{5.19}$$

$$-\mathbf{U}_{f1} + \mathbf{Z}_l \cdot \mathbf{I}_2 + \mathbf{U}_{f2} = 0 \quad (5.20)$$

Po úpravách přejdou tyto rovnice na tvar

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{Y}_q \cdot \mathbf{U}_{f2} + (1 + \mathbf{Z}_l \cdot \mathbf{Y}_q) \mathbf{I}_2, \quad (5.21)$$

$$\mathbf{U}_{f1} = \mathbf{U}_{f2} + \mathbf{Z}_l \cdot \mathbf{I}_2. \quad (5.22)$$

Pro přenosové konstanty bude tedy platit

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_\Gamma &= 1 & \mathbf{B}_\Gamma &= \mathbf{Z}_l \\ \mathbf{C}_\Gamma &= \mathbf{Y}_q & \mathbf{D}_\Gamma &= 1 + \mathbf{Z}_l \cdot \mathbf{Y}_q \end{aligned} \quad (5.23)$$

Pro článek s příčným prvkem na výstupu dostáváme podle Kirchhoffových zákonů tyto rovnice

$$-\mathbf{U}_{f1} + \mathbf{Z}_l \cdot \mathbf{I}_1 + \mathbf{U}_{f2} = 0, \quad (5.24)$$

$$-\mathbf{I}_1 + \mathbf{Y}_q \cdot \mathbf{U}_{f2} + \mathbf{I}_2 = 0. \quad (5.25)$$

Úpravou rovnic (5.24) a (5.25) získáme následující vztahy

$$\mathbf{U}_{f1} = (1 + \mathbf{Z}_l \cdot \mathbf{Y}_q) \mathbf{U}_{f2} + \mathbf{Z}_l \cdot \mathbf{I}_2, \quad (5.26)$$

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{Y}_q \cdot \mathbf{U}_{f2} + \mathbf{I}_2. \quad (5.27)$$

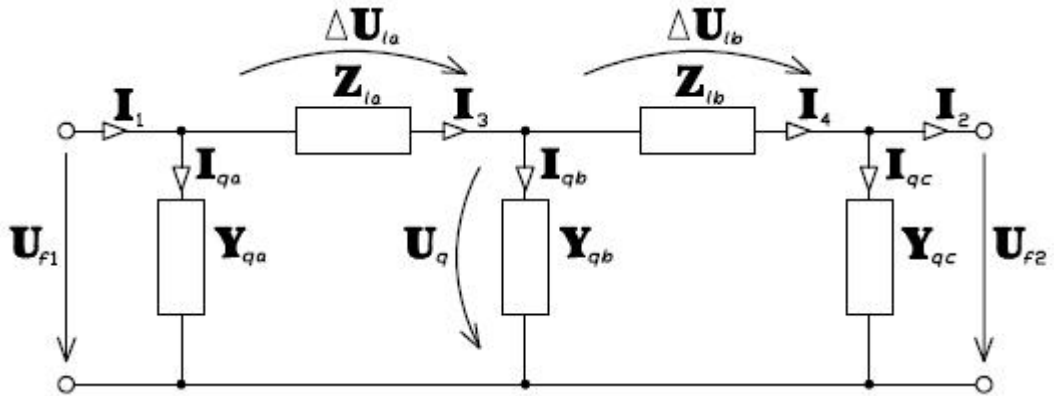
A přenosové konstanty potom budou

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_\Gamma &= 1 + \mathbf{Z}_l \cdot \mathbf{Y}_q & \mathbf{B}_\Gamma &= \mathbf{Z}_l \\ \mathbf{C}_\Gamma &= \mathbf{Y}_q & \mathbf{D}_\Gamma &= 1 \end{aligned} \quad (5.28)$$

Dá se říct, že Γ -článek je speciálním případem π -článku, který má jednu ze dvou příčných admitancí vždy nulovou. Postupné řešení a konstrukci fázorového diagramu nebudeme již provádět. S přehledem lze využít poznatků získaných v kapitole 5.1 o π -článku.

5.4 Steinmetzův článek

Jde o spojení článku T a článku π (Obr.5-9). Použitím tohoto dvojbranu získáváme daleko přesnější řešení než tomu bylo u π -článku nebo T-článku. Lze jej s výhodou použít i pro větší délky vedení. Odvozování vztahů mezi proudy a napětími na výstupu a vstupu článku provádíme stejným způsobem jako v předchozích kapitolách. Přenosové konstanty vyjdou složitější, jelikož se řešení blíží přesné metodě při rozvoji hyperbolických funkcí.



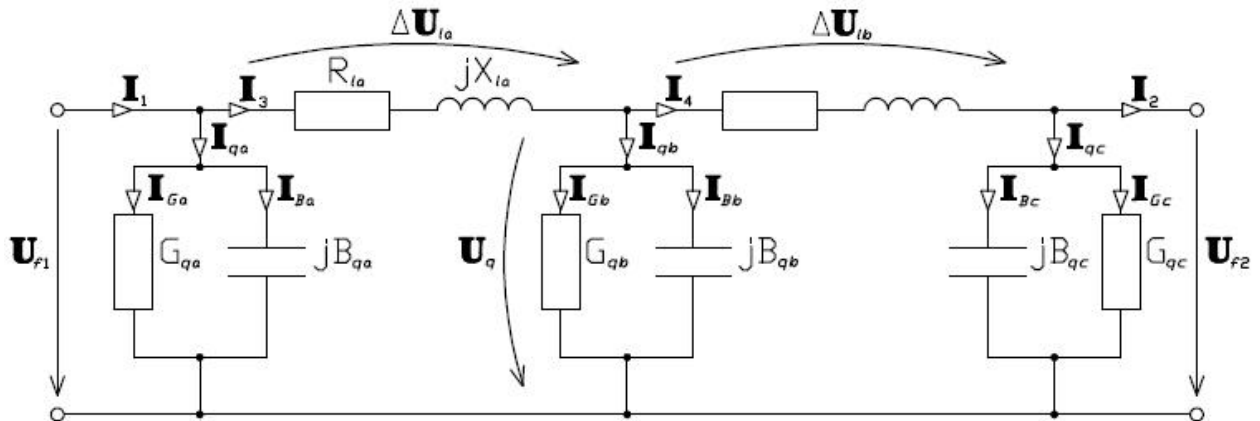
Obr.5-9 Náhradní Steinmetzův článek

Přenosové konstanty Steinmetzova článku tedy jsou

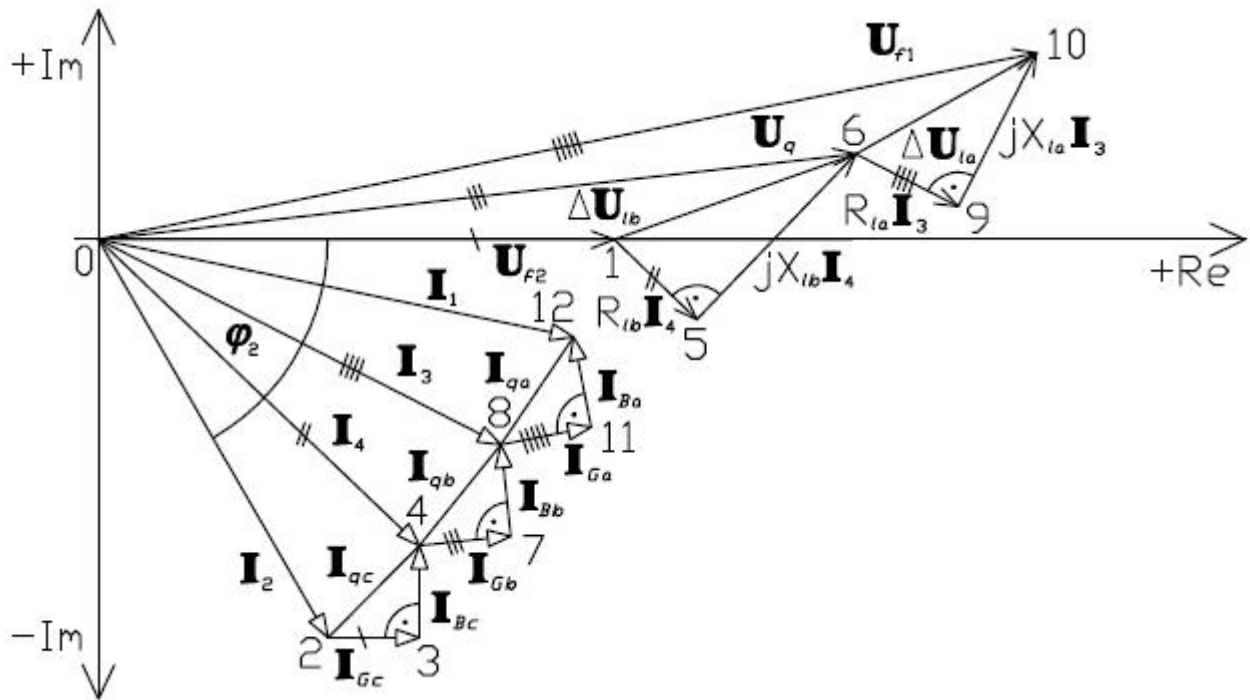
$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_{\text{St}} &= 1 + \frac{\mathbf{Z}_l \cdot \mathbf{Y}_q}{2} + \frac{\mathbf{Z}_l^2 \cdot \mathbf{Y}_q^2}{36} & \mathbf{B}_{\text{St}} &= \left(1 + \frac{\mathbf{Z}_l \cdot \mathbf{Y}_q}{6} \right) \mathbf{Z}_l \\
 \mathbf{C}_{\text{St}} &= \left(1 + \frac{5\mathbf{Z}_l \cdot \mathbf{Y}_q}{36} + \frac{\mathbf{Z}_l^2 \cdot \mathbf{Y}_q^2}{216} \right) \mathbf{Y}_q & \mathbf{D}_{\text{St}} &= 1 + \frac{\mathbf{Z}_l \cdot \mathbf{Y}_q}{2} + \frac{\mathbf{Z}_l^2 \cdot \mathbf{Y}_q^2}{36}
 \end{aligned} \quad (5.29)$$

Index „St“ u přenosových konstant ve vztazích (5.29) má význam jako označení Steinmetzova článku.

Náhradní Steinmetzův článek si rozkreslíme podle schématu (Obr.5-10). Zatížíme jej zátěží inductivního charakteru. Zátěží bude protékat proud \mathbf{I}_2 a bude na ní napětí \mathbf{U}_2 . Pro tyto podmínky opět nakreslíme fázorový diagram (Obr.5-11). Kreslíme jej podle stejného postupu jako byl aplikován na článek π .



Obr.5-10 Podrobné schéma Steinmetzova článku



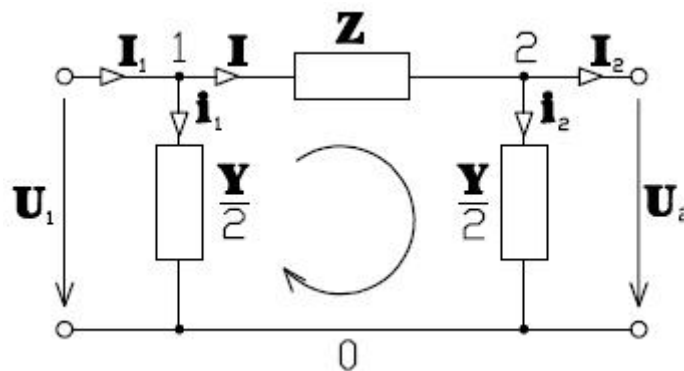
Obr.5-11 Fázorový diagram Steinmetzova článku

6 ZVLÁŠTNÍ PŘÍPADY CHODU VEDENÍ

Mezi tyto zvláštní případy zařazujeme chod vedení naprázdno, chod vedení nakrátko a chod vedení s přirozeným výkonem. Odvození rovnic, charakterizující tyto stavy, lze provést použitím vztahů pro přesné řešení (4.35) a (4.36), nebo použitím postupných kaskádních rovnic náhradního dvojbranu, případně jiných zjednodušení na tvar, který získají idealizací elektrických parametrů, což je obvykle bezeztrátové vedení ($R_1 = G_1 = 0$).

Rovnice pro tyto případy odvodíme za pomoci náhradního, symetrického π -čláčku, u něhož zanedbáme svod ($G_k = 0$; Obr.6-1) a použitím rovnic pro přesné řešení (4.35) a (4.36).

Zkoumání zvláštních případů chodu vedení napomáhá ke snadnějšímu pochopení některých fyzikálních vlastností vedení.



Obr.6-1 Náhradní π -článek k odvození rovnic

Pro uzly 1, 2 a smyčku v obvodu (Obr.6-1) platí:

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_2 + \mathbf{Z}\mathbf{I} \quad (6.1)$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_2 + \mathbf{U}_2 \frac{\mathbf{Y}}{2} \quad (6.2)$$

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I} + \mathbf{U}_1 \frac{\mathbf{Y}}{2} \quad (6.3)$$

6.1 Chod vedení naprázdno

Chod vedení naprázdno se označuje indexem „0“ a je definován následujícími rovnicemi

$$\mathbf{S}_{20} = 0, \quad \mathbf{I}_{20} = 0, \quad \mathbf{U}_{20} \neq 0, \quad |\mathbf{Z}_{20}| = \infty. \quad (6.4)$$

Dosazením (6.4) do rovnic (6.1), (6.2) a (6.3) přejdou tyto rovnice na tvar:

$$\mathbf{U}_{10} = \mathbf{U}_{20} + \mathbf{I}_0 \mathbf{Z} \quad (6.5)$$

$$\mathbf{I}_0 = \mathbf{U}_{20} \frac{\mathbf{Y}}{2} \quad (6.6)$$

$$\mathbf{I}_{10} = \mathbf{I}_0 + \mathbf{U}_{10} \frac{\mathbf{Y}}{2}. \quad (6.7)$$

Jestliže dosadíme do rovnic pro přesné řešení (4.35) a (4.36) definiční rovnice chodu naprázdno (6.4) a za x celkovou délku vedení l , dostaneme

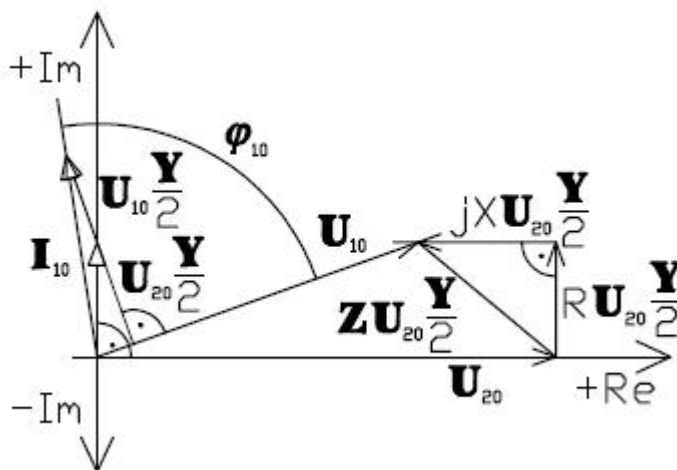
$$\mathbf{I}_{10} = \frac{\mathbf{U}_{20}}{\mathbf{Z}_v} \sinh \gamma l = \mathbf{U}_{20} \mathbf{C}, \quad (6.8)$$

$$\mathbf{U}_{10} = \mathbf{U}_{20} \cosh \gamma l = \mathbf{U}_{20} \mathbf{A}. \quad (6.9)$$

Impedance vedení naprázdno

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

Rovnice (6.5), (6.6) a (6.7) můžeme graficky znázornit pomocí fázorového diagramu (Obr.6-2). Z tohoto obrázku je vidět, že fázový posun mezi napětím a proudem naprázdno je kladný a úhel φ_{10} se blíží k 90° . Impedance vedení naprázdno \mathbf{Z}_{10} má proto kapacitní charakter. Dále lze vidět, že napětí naprázdno na konci vedení, tedy napětí \mathbf{U}_{20} , je větší než napětí naprázdno na začátku vedení, \mathbf{U}_{10} . Tento jev se nazývá **Ferrantiho jev** a nastává nejčastěji při náhlém odlehčení vedení (odpojení zatížení při poruše). U dlouhých vedení je tento jev nebezpečný z důvodu možného poškození izolace.



Obr.6-2 Fázorový diagram π -článku při chodu naprázdno

6.2 Chod vedení nakrátko

Chod vedení nakrátko se označuje indexem „ k “ a je definován těmito rovnicemi

$$\mathbf{S}_{2k} = 0, \quad \mathbf{U}_{2k} = 0, \quad \mathbf{I}_{2k} \neq 0, \quad |\mathbf{Z}_{2k}| = 0. \quad (6.11)$$

Dosazením (6.11) do rovnic (6.1), (6.2) a (6.3) přejdou tyto rovnice na tvar:

$$\mathbf{U}_{1k} = \mathbf{Z} \mathbf{I}_{2k} \quad (6.12)$$

$$\mathbf{I}_k = \mathbf{I}_2 \quad (6.13)$$

$$\mathbf{I}_{1k} = \mathbf{I}_k + \mathbf{U}_{1k} \frac{\mathbf{Y}}{2}. \quad (6.14)$$

Opět provedeme dosazení rovnic (6.11) do rovnic přesného řešení (4.35) a (4.36), za x dosadíme délku vedení l a získáme rovnice

$$\mathbf{I}_{1k} = \mathbf{I}_{2k} \cosh \gamma l = \mathbf{I}_{2k} \mathbf{A}, \quad (6.15)$$

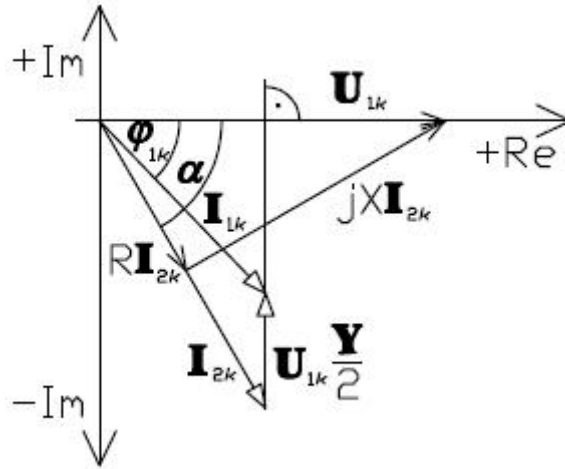
$$\mathbf{U}_{1k} = \mathbf{I}_{2k} \mathbf{Z}_v \sinh \gamma l = \mathbf{I}_{2k} \mathbf{B}. \quad (6.16)$$

Impedance vedení nakrátko

$$\mathbf{Z}_{1k} = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{A}}. \quad (6.17)$$

Grafické znázornění rovnic (6.12), (6.13) a (6.14) nám udává fázorový diagram na obrázku (Obr.6-3). Fázový posuv φ_{1k} je záporný a blíží se k úhlu α . Z toho plyne, že charakter impedance vedení nakrátko \mathbf{Z}_{1k} je induktivní. Úhel α je úhel vedení a je dán vztahem

$$\alpha = \arctan \frac{X_k}{R_k}. \quad (6.18)$$



Obr.6-3 Fázorový diagram π -článku při chodu nakrátko

6.3 Chod vedení s přirozeným výkonem

Jestliže je vedení zatíženo spotřebičem o impedanci, která je rovna impedanci vlnové, mluvíme o chodu vedení s přirozeným výkonem. Budeme jej označovat indexem „p“.

Pro chod vedení s přirozeným výkonem bude platit

$$\mathbf{Z}_2 = \mathbf{Z}_v = \frac{\mathbf{U}_2}{\mathbf{I}_2} = \sqrt{\frac{\mathbf{Z}_k}{\mathbf{Y}_k}}, \quad \mathbf{U}_2 = \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_v. \quad (6.19)$$

Dosazením této rovnosti do vztahů pro výpočet integračních konstant (4.33) a (4.29) dostáváme následující vztahy

$$\mathbf{A}_1 = \frac{\mathbf{U}_2 + \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_v}{2\mathbf{Z}_v} = \frac{\mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_v + \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_v}{2\mathbf{Z}_v} = \mathbf{I}_2, \quad (6.20)$$

$$\mathbf{A}_2 = \frac{\mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_v - \mathbf{U}_2}{2\mathbf{Z}_v} = \frac{\mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_v - \mathbf{I}_2 \mathbf{Z}_v}{2\mathbf{Z}_v} = 0, \quad (6.21)$$

$$\mathbf{A}_3 = \mathbf{Z}_v \mathbf{A}_1 = \mathbf{Z}_v \mathbf{I}_2 = \mathbf{U}_2, \quad (6.22)$$

$$\mathbf{A}_4 = -\mathbf{Z}_v \mathbf{A}_2 = 0. \quad (6.23)$$

Takto vyjádřené integrační konstanty dosadíme do vztahů (4.23), (4.24) a dostaneme

$$\mathbf{I}_p(x) = \mathbf{I}_2 e^{\gamma x} = \mathbf{I}_2 e^{al} (\cos \beta l + j \sin \beta l), \quad (6.24)$$

$$\mathbf{U}_p(x) = \mathbf{U}_2 e^{\gamma x} = \mathbf{U}_2 e^{al} (\cos \beta l + j \sin \beta l). \quad (6.25)$$

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 je konstantní. Z čehož plyne, že v každém místě vedení je impedance stejná a je rovna impedanci vlnové \mathbf{Z}_v . Při přenosu vlnového výkonu se kromě činného výkonu přenáší také malá část jalového výkonu, kapacitního charakteru. Trojfázový přirozený výkon na konci vedení

$$\mathbf{S}_{2p} = 3\mathbf{U}_{f2p}^* \mathbf{I}_{2p} = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_{f2p}^* \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{\mathbf{U}_{f2p}}{\mathbf{Z}_v} = \frac{U_{2p}^2}{\mathbf{Z}_v} \rightarrow \mathbf{S}_{1p} = \frac{U_{1p}^2}{\mathbf{Z}_v}. \quad (6.26)$$

7 OBECNÁ METODA ŘEŠENÍ SÍTÍ VVN A ZVN

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 sítí uzlových.

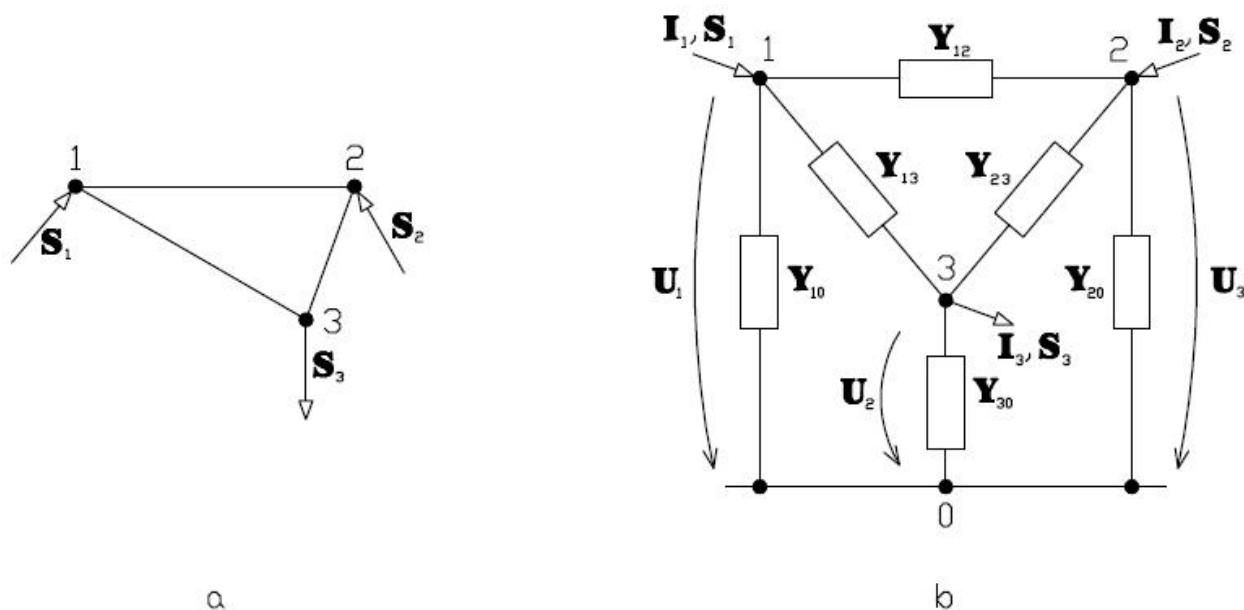
Uzlové sítě se používají z několika důvodů. V první řadě je to kvůli větší spolehlivosti dodávky elektrické energie, dále pak z důvodu hospodárnějšího provozu – je-li uzlová síť dobře navržena a správně řízena, jsou ztráty přenášeného výkonu menší než u sítí jednoduchých. Za další je to změna napětí 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 výpočtu přijímáme tato zjednodušení:

- Soustava je trojfázová a zcela souměrná ve zdrojích i ve spotřebičích, uvažuje se bezporuchový ustálený chod sítě. Stačí proto řešit poměry jen v jedné fázi obvodu.
- Frekvence se považuje za konstantní a rovna frekvenci jmenovité. Připouští se pouze první harmonické proudy nebo napětí.
- Homogenní vedení mezi uzly sítě nahrazujeme π -články, ostatní prvky nahrazujeme Γ -články.
- Napájecí a odběrové uzly jsou zadány pomocí výkonů. Změna výkonu s napětím se neuvažuje – neuvažuje se jejich statická charakteristika.

Výkonové rovnice vyjadřují závislost mezi komplexními výkony a napětím ve všech uzlech sítě. Odvození těchto rovnic provedeme na síti, která je zobrazena na obrázku (Obr.7-1a). Jestliže jednotlivé větve této sítě nahradíme π -články, dostaneme schéma obvodu, které je na obrázku (Obr.7-1b). Uzel 0 je střední vodič spojený se zemí a je referenčním uzlem pro všechna uzlová napětí.



Obr.7-1 a) schéma dané sítě b) schéma sítě po náhradě jednotlivých větví π -články

V náhradním schématu jsme přijali tato označení:

\mathbf{Y}_{ij} je podélná admitance za vedení mezi uzly i a j

\mathbf{Y}_{i0} je polovina součtu příčných admitancí všech vedení, které vychází z i -tého uzlu,

$$\mathbf{Y}_{i0} = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^b \mathbf{Y}_{ijp}^{(0)}, \quad (7.1)$$

kde $\mathbf{Y}_{ijp}^{(0)}$ je příčná admitance vedení mezi uzly i a j ,

b je počet vedení, které vycházejí z i -tého uzlu,

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

S užitím metody uzlových napětí lze náhradní schéma dané sítě popsat třemi komplexními rovnicemi. Pomocí maticového zápisu dostaneme

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ -\mathbf{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & -\mathbf{Y}_{12} & -\mathbf{Y}_{13} \\ -\mathbf{Y}_{12} & \mathbf{Y}_{22} & -\mathbf{Y}_{23} \\ -\mathbf{Y}_{13} & -\mathbf{Y}_{23} & \mathbf{Y}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_3 \end{bmatrix}, \quad (7.2)$$

kde \mathbf{Y}_{ii} je součet admitancí všech větví náhradního schématu, které vycházejí z i -tého uzlu

$$\mathbf{Y}_{ii} = \mathbf{Y}_{i0} + \sum_{p=1}^b \mathbf{Y}_{ijp}. \quad (7.3)$$

V případě obecné sítě s n uzly můžeme náhradní schéma popsat n lineárními komplexními rovnicemi

$$\mathbf{I}_i = \mathbf{Y}_{ii} \mathbf{U}_i - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (7.4)$$

Tuto soustavu rovnic nelze pro výpočet napětí $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2, \dots, \mathbf{U}_n$ použít, protože proudy na levých stranách rovnic jsou závislé na neznámých napětích a nelze je proto ze zadaných výkonů odběrů a zdrojů stanovit. Platí:

$$\mathbf{I}_i^* = \frac{\mathbf{S}_i}{3 \cdot \mathbf{U}_i}. \quad (7.5)$$

Dosazením vztahu (7.5) do vztahu (7.4) dostaneme

$$\mathbf{S}_i^* = 3 \left(\mathbf{Y}_{ii} U_i^2 - \mathbf{U}_i^* \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j \right), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7.6)$$

již zmíněné výkonové rovnice sítě. Tyto rovnice jsou z hlediska neznámých napětí kvadratické komplexní rovnice, které se řeší přibližným výpočtem.

7.1 Podmínky určitosti chodu sítí VVN a ZVN

Soustava výkonových rovnic (7.6) udává závislost mezi n fázory uzlových napětí a n komplexními výkony v uzlech. Rozložením na reálnou a imaginární část máme celkem $2n$ rovnic s $4n$ hodnotami, což jsou napětí v každém uzlu U_i , jeho fáze θ_i , činný výkon P_i a jalový výkon Q_i .

Úloha je určitá, je-li z tohoto počtu $2n$ nezávislých a $2n$ závislých proměnných. Vlastnosti popisovaného děje a soustavy výkonových rovnic omezují volbu proměnných.

Bilance činných a jalových výkonů v celé síti je rovna ztrátám ve všech prvcích sítě

$$\sum_{i=1}^n P_i = \sum_{p=1}^v \Delta P_p, \quad \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{p=1}^v \Delta Q_p, \quad (7.7)$$

kde $\Delta P_p, \Delta Q_p$ jsou činné a jalové ztráty výkonu v p -tém prvku sítě,
 n, v je počet uzlů a prvků sítě.

Kdybychom zvolili (zadali) za nezávislé proměnné všechny uzlové výkony (činné a jalové), pak by touto volbou byly určeny podle (7.7) ztráty. Vypočtená napětí a jejich fáze by mohly vyjít nereálné, případně by mohl vzniknout požadavek na další zdroj nebo spotřebič. Z tohoto důvodu se alespoň v jednom uzlu (bilančním) volí za nezávislé proměnnou napětí a jeho fáze.

V uzlech, ve kterých byly zvoleny za nezávislé proměnné činný a jalový výkon, nelze zvolit za nezávislé i napětí. Dvojice reálných rovnic pro činný a jalový výkon v tomtéž uzlu jsou totiž vzájemně závislé – liší se pouze goniometrickou funkcí.

$$P_i = 3 \left[Y_{ii} U_i^2 \cos \alpha_{ii} - U_i \cos(-\theta_i) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} \cos \alpha_{ij} U_j \cos \theta_j \right] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7.8)$$

$$Q_i = 3 \left[Y_{ii} U_i^2 \sin \alpha_{ii} - U_i \sin(-\theta_i) \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} \sin \alpha_{ij} U_j \sin \theta_j \right] \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7.9)$$

kde $\mathbf{Y}_{ii} = Y_{ii} \angle \alpha_{ii}$, $\mathbf{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \alpha_{ij}$, $\mathbf{U}_i = U_i \angle \theta_i$.

Bez dalšího podrobného zdůvodňování je chod sítě určitý, soustava rovnic (7.6) je k řešení použitelná, je-li zadáno $2n$ veličin chodu takto:

- k napětí,
- jeden úhel fázoru napětí,
- nejvýše $n-1$ činných výkonů,
- nejvýše $n-k$ jalových výkonů,

s podmínkou, že napětí nelze volit za nezávislé proměnnou v tom uzlu, ve kterém je zadán činný a jalový výkon ani v uzlu sousedním.

V praktických úlohách lze podmínkám určitosti chodu sítě vyhovět členěním uzlů do tří skupin:

1. jeden uzel bilanční se zadaným napětím (modulem i fází). Výkon tohoto uzlu (zdroje) hradí ztráty činného a jalového výkonu a případnou nevyrovnanost bilance uzlových výkonů. Velikost výkonu v bilančním uzlu se stanoví bilancí výkonu prvků připojených k tomuto uzlu.
2. k odběrových a zdrojových uzlů, ve kterých je zadán činný a jalový výkon.
3. $n-k-1$ regulačních uzlů, ve kterých je zadán činný výkon a napětí. Jalový výkon a fázový posun napětí v těchto uzlech je závisle proměnná.

7.2 Gauss-Seidlova metoda řešení rovnic chodu sítě s odběrovými uzly

Přesné řešení soustavy výkonových rovnic (7.6) je obtížné. Řeší se proto přibližně pomocí iteračních metod, kterých je několik. Liší se množstvím početních operací nutných k dosažení téže výsledku a veličinou, která je v průběhu výpočtu srovnávána s požadovanou přesností. Popišme zde pouze jedinou Gauss-Seidlovu metodu pro případ, kdy jsou v řešené síti pouze dva typy uzlů – jeden bilanční a zbývající uzly odběrové nebo zdrojové.

Předpokládejme, že bilanční uzel má označení 1, zadané napětí a jeho fázi $\mathbf{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ$.

Ostatní uzly s označením 2 až n mají zadány činné a jalové výkony odběrů nebo zdrojů. V těchto uzlech chceme přibližným výpočtem stanovit napětí a jejich fáze. K tomu účelu přepíšeme výkonové rovnice do tvaru

$$\mathbf{U}_i = \frac{1}{\mathbf{Y}_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{3\mathbf{U}_i^*} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \mathbf{U}_j \mathbf{Y}_{ij} \right), \quad i = 2, 3, \dots, n. \quad (7.10)$$

Výpočetní postup spočívá v odhadu napětí $\mathbf{U}_2, \mathbf{U}_3, \dots, \mathbf{U}_n$ a jeho srovnání s hodnotami stanovenými podle (7.10). Velikostí rozdílu vypočtených a odhadnutých hodnot se posuzuje správnost odhadu. Při větších rozdílech než je požadovaná přesnost se provede odhad nový a srovnání se opakuje. Postup předpokládá, že jsou známé prvky admitanční uzlové matice $[\mathbf{Y}]$ řešené sítě.

Iterační výpočet se provádí v těchto krocích:

1. Provede se první odhad napětí $\mathbf{U}_i^{(0)}$ pro $i = 2, 3, \dots, n$. Obvykle se tato napětí volí ve všech uzlech stejná v modulu i fázi. Např. jmenovité napětí bilančního uzlu.
2. Odhadnutá napětí se dosadí do pravé strany první rovnice (7.10), $i = 2$.

$$\mathbf{U}_2^{(1)} = \frac{1}{\mathbf{Y}_{22}} \left(\frac{P_2 - jQ_2}{3\mathbf{U}_2^{(0)*}} + \mathbf{U}_1 \mathbf{Y}_{12} + \sum_{j=3}^n \mathbf{U}_j^{(0)} \mathbf{Y}_{2j} \right) \quad (7.11)$$

3. Původní odhad napětí zpřesníme o hodnotu napětí druhého uzlu stanoveného podle (7.11), takže napětí třetího uzlu počítáme pomocí odhadu $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2^{(1)}, \mathbf{U}_3^{(0)}, \mathbf{U}_4^{(0)}, \dots, \mathbf{U}_n^{(0)}$.

$$\mathbf{U}_3^{(1)} = \frac{1}{\mathbf{Y}_{33}} \left(\frac{P_3 - jQ_3}{3\mathbf{U}_3^{(0)*}} + \mathbf{U}_1 \mathbf{Y}_{13} + \mathbf{U}_2^{(1)} \mathbf{Y}_{23} + \sum_{j=4}^n \mathbf{U}_j^{(0)} \mathbf{Y}_{3j} \right). \quad (7.12)$$

Před výpočtem napětí čtvrtého uzlu $\mathbf{U}_4^{(1)}$ zpřesníme odhad o hodnotu napětí $\mathbf{U}_3^{(1)}$, takže napětí čtvrtého uzlu počítáme pomocí $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2^{(1)}, \mathbf{U}_3^{(1)}, \mathbf{U}_4^{(0)}, \dots, \mathbf{U}_n^{(0)}$.

Takto postupně počítáme uzlová napětí a zpřesňujeme odhad v n krocích až po napětí posledního n -tého uzlu.

Dále pro všechna neznámá napětí stanovíme rozdíl

$$|\mathbf{U}_i^{(0)} - \mathbf{U}_i^{(1)}| \quad i = 2, 3, \dots, n. \quad (7.13)$$

Je-li kterýkoliv rozdíl větší než požadovaná přesnost přibližného stanovení uzlových napětí ε , pak se celý výpočet od kroku 1. opakuje s počátečním odhadem z konce první iterace.

Celý postup lze matematicky vyjádřit vztahem

$$\mathbf{U}_i^{(p+1)} = \frac{1}{\mathbf{Y}_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{3\mathbf{U}_i^{(p)*}} + \sum_{j=1}^{i-1} \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j^{(p+1)} + \sum_{j=i+1}^n \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j^{(p)} \right) \quad (7.14)$$

pro $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2^{(0)}, \mathbf{U}_3^{(0)}, \dots, \mathbf{U}_n^{(0)}$, $i = 2, 3, \dots, n$, $p = 0, 1, 2, \dots, m$ kde $(p+1)$ a p jsou čísla iterací.

Výpočet se ukončí je-li

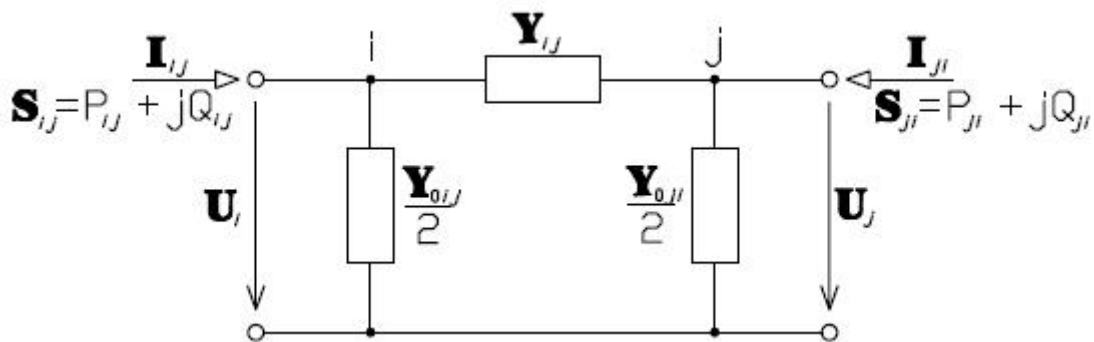
$$|\mathbf{U}_i^{(p)} - \mathbf{U}_i^{(p+1)}| \leq \varepsilon \quad i = 2, 3, \dots, n. \quad (7.15)$$

K vyčíslení ztrát činného a jalového výkonu a k zhodnocení využití vedení je třeba stanovit výkony na vstupu a výstupu každého z nich. Z řešení výkonových rovnic jsou známá napětí všech uzlů. Použijeme-li pro tuto úlohu náhradu vedení π -článkem (Obr.7-2), pak mezi proud tekoucí do vedení mezi uzly i a j ze strany i -tého uzlu je

$$\mathbf{I}_{ij} = (\mathbf{U}_i - \mathbf{U}_j) \mathbf{Y}_{ij} + \mathbf{U}_i \frac{\mathbf{Y}_{0ij}}{2} \quad (7.16)$$

a výkon do téhož vedení ze strany i -tého uzlu je

$$\mathbf{S}_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = 3\mathbf{U}_i \mathbf{I}_{ij}^* = 3\mathbf{U}_i \left[(\mathbf{U}_i - \mathbf{U}_j) \mathbf{Y}_{ij} + \mathbf{U}_i \frac{\mathbf{Y}_{0ij}}{2} \right]^* \quad (7.17)$$



Obr.7-2 Náhrada vedení π -článkem k výpočtu ztrát

Z opačné strany, tj. z uzlu j -tého, je vedení zatíženo výkonem

$$\mathbf{S}_{ji} = 3\mathbf{U}_j \left[(\mathbf{U}_j - \mathbf{U}_i) \mathbf{Y}_{ij} + \mathbf{U}_j \frac{\mathbf{Y}_{0ij}}{2} \right]^* \quad (7.18)$$

Ztráty činného a jalového výkonu v tomto vedení jsou

$$\begin{aligned} \Delta P_{ij} &= P_{ij} + P_{ji} \\ \Delta Q_{ij} &= Q_{ij} + Q_{ji} \end{aligned} \quad (7.19)$$

7.3 Gauss-Seidlova metoda řešení rovnic chodu sítě s odběrovými a regulačními uzly

Síť kromě bilančního uzlu a uzlů odběrových obsahuje i uzly regulační, ve kterých je zadán činný výkon P_i a modul napětí U_i . V regulačních uzlech je třeba stanovit jalový výkon Q_i a fázi napětí θ_i .

V každé iteraci je nutné před výpočtem napětí regulačního uzlu odhadnout jalový výkon v něm

$$Q_i^{(p+1)} = 3 \operatorname{Im}\{\mathbf{U}_i^{(p)} \mathbf{I}_i^{(p)*}\}. \quad (7.20)$$

Do rovnice (7.20) dosadíme za proud v i -tém uzlu $\mathbf{I}_i^{(p)}$ v p -té iteraci z i -té rovnice (7.4).

$$Q_i^{(p+1)} = 3 \operatorname{Im}\left\{\mathbf{U}_i^{(p)} - \left(\mathbf{Y}_{ii} \mathbf{U}_i^{(p)} - \sum_{j=1}^{i-1} \mathbf{U}_j^{(p+1)} \mathbf{Y}_{ij} - \sum_{j=i+1}^n \mathbf{U}_j^{(p)} \mathbf{Y}_{ij}\right)^*\right\} \quad (7.21)$$

Tento p -tý odhad jalového výkonu regulačního uzlu použijeme k výpočtu napětí v tomtéž uzlu podle (7.14)

$$\mathbf{U}_{iQ}^{(p+1)} = \frac{1}{\mathbf{Y}_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i^{(p+1)}}{3\mathbf{U}_i^{(p)*}} + \sum_{j=1}^{i-1} \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j^{(p+1)} + \sum_{j=i+1}^n \mathbf{Y}_{ij} \mathbf{U}_j^{(p)} \right). \quad (7.22)$$

Z tohoto napětí $U_{iQ}^{(p+1)} \angle \theta_{iQ}^{(p+1)}$ použijeme pro zpřesnění odhadu pouze úhel $\theta_{iQ}^{(p+1)}$, protože velikost napětí je zadána

$$\mathbf{U}_i^{(p+1)} = U_i \angle \theta_{iQ}^{(p+1)}, \quad (7.23)$$

kde U_i je zadaná hodnota modulu napětí regulačního uzlu.

Další postup je shodný jako v případě sítě bez regulačních uzlů.

Tato kapitola je uvedena pouze pro doplnění metod řešení ustáleného chodu vedení vvn a zvn. Jak už bylo zmíněno na začátku kapitoly, aplikuje se tato metoda na uzlové sítě. V této práci se budeme dále zabývat řešením jednoho vedení, jedné větve zauzlené sítě. Proto tato metoda v této práci nenajde dále uplatnění.

8 GRAFICKÉ METODY VÝPOČTU VEDENÍ

V dnešní době výpočetní techniky se již tyto metody v praxi zpravidla nepoužívají. Pro svoji přehlednost a názornost se s nimi lze setkat v nauce o elektrických vedení nebo tam, kde „nelze“ použít výpočetní techniku.

Základním předpokladem pro vznik těchto grafických metod spočíval v nedostatku výše zmíněných metod. Pomocí nich bylo možno stanovit pouze jeden provozní stav vedení, což v praxi byl problém, jelikož v praktickém řízení elektrických vedení se vstupní podmínky mění. Tyto metody, bez opakování celého výpočtu, dávají přehled o provozních poměrech na obou koncích vedení.

Bylo vyvinuto nespočet 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 grafickém zpracování.

Nyní bude uveden stručný přehled některých grafických metod.

Fázorový diagram $\mathbf{U, I} = f(P, Q)$ - vychází ze superpozice stavu naprázdno a nakrátko.

Trojpólový diagram - odstraňuje nevýhodu kreslení dvou fázorových diagramů pro napětí a proud ($\mathbf{U}_1, \mathbf{I}_1$). Vychází ze základních rovnic (4.35) a (4.36), kde platí (4.42). Lze tedy pomocí něj graficky určit, pro jakékoliv zadané \mathbf{I}_2 a konstantní $\mathbf{U}_2, \mathbf{U}_1, \mathbf{I}_1$ na začátku vedení.

Fallouuvův diagram - zjednodušuje trojpólový diagram pro vedení 400 km. Vychází z rozvinutých hyperbolických funkcí v řady (4.39), (4.40), (4.41) tak, že zjednodušuje pro $\cosh x$ na dva členy a pro $\sinh x$ pouze na jeden člen. Diagram se kreslí v procentních hodnotách napětí ($\mathbf{U}_2 = 100\%$).

Kružnicový diagram - vychází z výkonových rovnic přenosu. Diagram lze použít pro grafické určení výkonů $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2$ pro různá napětí a jejich fázi na začátku a na konci vedení. Pokud je potřeba určit více provozních stavů, vychází se obvykle z omezující podmínky, např. jedno napětí volíme konstantní.

9 PŘESNÝ VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU VEDENÍ

V této kapitole bude proveden výpočet poměrů na začátku zadaného vedení pomocí základních rovnic vedení s rovnoměrně rozloženými parametry. Tyto rovnice a další použité vztahy byly odvozeny v kapitole 4.1. V této části se již budeme na tyto vztahy pouze odkazovat.

Zadané parametry řešeného vedení:

<i>Délka</i>	$l = 300 \text{ km}$
<i>Jmenovité napětí, napětí na konci vedení</i>	$U_n = U_2 = 400 \text{ kV}$
<i>Činný výkon odebíraný na konci vedení</i>	$P_2 = 350 \text{ MW}$
<i>Účinnost odběru</i>	$\cos\varphi_2 = 0,9 \text{ ind}$
<i>Podélná impedance vedení na jednotku délky</i>	$\mathbf{Z}_k = (0,0298 + j0,253) \Omega \cdot \text{km}^{-1} =$ $= 0,255 \angle 83,3^\circ \Omega \cdot \text{km}^{-1}$
<i>Příčná admitance vedení na jednotku délky</i>	$\mathbf{Y}_k = (0,0156 + j4,355) \cdot 10^{-6} \text{ S} \cdot \text{km}^{-1} =$ $= 4,355 \cdot 10^{-6} \angle 89,8^\circ \text{ S} \cdot \text{km}^{-1}$.

Nejprve spočteme veličiny, které budeme používat ve výpočtech nejen v této kapitole. Bude to zejména podélná impedance a příčná admitance daného vedení, odebíraný proud na konci vedení, resp. jeho fázor. Fázor napětí na konci vedení bude mít zadanou velikost a nulovou fázi. Dále si stanovíme vlnovou impedanci vedení a činitel šíření.

Fázor napětí na konci vedení

$$\mathbf{U}_2 = 400 \angle 0^\circ \text{ kV}$$

a jeho fázová hodnota

$$\mathbf{U}_{f2} = \frac{\mathbf{U}_2}{\sqrt{3}} = \frac{400 \cdot 10^3 \angle 0^\circ \text{ V}}{\sqrt{3}} = \underline{230940,1077 \angle 0^\circ \text{ V}} \doteq \underline{230,9401 \angle 0^\circ \text{ kV}}.$$

Modul odebíraného proudu na konci vedení stanovíme ze vztahu

$$I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot \cos\varphi_2} = \frac{350 \cdot 10^6 \text{ W}}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3 \text{ V} \cdot 0,9} = \underline{561,3128 \text{ A}}.$$

Fázor odebíraného proudu na konci vedení potom bude

$$\mathbf{I}_2 = I_2 (\cos\varphi_2 - j \sin\varphi_2) = 561,3128 \text{ A} \cdot (0,9 - j0,4359)$$

$$\mathbf{I}_2 = \underline{(505,1815 - j244,6762) \text{ A}} = \underline{561,3152 \angle -25,84^\circ \text{ A}}$$

kde $\sin\varphi_2$ určíme ze základního vztahu pro goniometrické funkce

$$\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1 \Rightarrow \sin \varphi_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2} = \sqrt{1 - 0,9^2}$$

$$\sin \varphi_2 = 0,4359.$$

Ze vztahu (4.30) stanovíme vlnovou impedanci

$$\mathbf{Z}_v = \sqrt{\frac{\mathbf{Z}_k}{\mathbf{Y}_k}} = \sqrt{\frac{(0,0298 + j0,253) \Omega \cdot \text{km}^{-1}}{(0,0156 + j4,355) \cdot 10^{-6} \text{ S} \cdot \text{km}^{-1}}}$$

$$\mathbf{Z}_v = \underline{(241,47 - j13,738) \Omega} = \underline{241,8605 \angle -3,26^\circ \Omega}.$$

Dále určíme činitel šíření

$$\gamma = \sqrt{\mathbf{Z}_k \mathbf{Y}_k} = \sqrt{(0,0298 + j0,253)\Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot (0,0156 + j4,355) \cdot 10^{-6} \text{S} \cdot \text{km}^{-1}}$$

$$\gamma = (63,5684 + j1051,38) \cdot 10^{-6} \text{km}^{-1} = 1,0533 \cdot 10^{-3} \angle 86,54^\circ \text{km}^{-1}.$$

Blondelovy konstanty vedení určíme ze vztahů (4.38), (4.39) a (4.40). Dosazení patřičných hodnot provedeme přímo do rozvoje hyperbolických funkcí

$$\mathbf{A} = 1 + \frac{0,255 \angle 83,3^\circ \Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot 4,355 \cdot 10^{-6} \angle 89,8^\circ \text{S} \cdot \text{km}^{-1} \cdot 300^2 \text{km}}{2} +$$

$$+ \frac{(0,255 \angle 83,3^\circ \Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot 4,355 \cdot 10^{-6} \angle 89,8^\circ \text{S} \cdot \text{km}^{-1})^2 \cdot 300^4 \text{km}}{24} +$$

$$+ \frac{(0,255 \angle 83,3^\circ \Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot 4,355 \cdot 10^{-6} \angle 89,8^\circ \text{S} \cdot \text{km}^{-1})^4 \cdot 300^6 \text{km}}{720} +$$

$$+ \frac{(0,255 \angle 83,3^\circ \Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot 4,355 \cdot 10^{-6} \angle 89,8^\circ \text{S} \cdot \text{km}^{-1})^6 \cdot 300^8 \text{km}}{40320}$$

$$\mathbf{A} = (950,8426 + j5,9182) \cdot 10^{-3} = 0,9509 \angle 0,36^\circ,$$

$$\mathbf{B} = 0,255 \angle 83,3^\circ \Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot 300 \text{km} \cdot \left[1 + \frac{0,255 \angle 83,3^\circ \Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot 4,355 \cdot 10^{-6} \angle 89,8^\circ \text{S} \cdot \text{km}^{-1} \cdot 300^2 \text{km}}{6} + \right.$$

$$+ \frac{(0,255 \angle 83,3^\circ \Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot 4,355 \cdot 10^{-6} \angle 89,8^\circ \text{S} \cdot \text{km}^{-1})^2 \cdot 300^4 \text{km}}{120} +$$

$$+ \frac{(0,255 \angle 83,3^\circ \Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot 4,355 \cdot 10^{-6} \angle 89,8^\circ \text{S} \cdot \text{km}^{-1})^4 \cdot 300^6 \text{km}}{5040} +$$

$$\left. + \frac{(0,255 \angle 83,3^\circ \Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot 4,355 \cdot 10^{-6} \angle 89,8^\circ \text{S} \cdot \text{km}^{-1})^6 \cdot 300^8 \text{km}}{362880} \right]$$

$$\mathbf{B} = (8,6423 + j74,67)\Omega = 75,1685 \angle 83,4^\circ \Omega$$

$$\mathbf{C} = 4,355 \cdot 10^{-6} \angle 89,8^\circ \text{S} \cdot \text{km}^{-1} \cdot 300 \text{km} \cdot \left[1 + \frac{0,255 \angle 83,3^\circ \Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot 4,355 \cdot 10^{-6} \angle 89,8^\circ \text{S} \cdot \text{km}^{-1} \cdot 300^2 \text{km}}{6} + \right.$$

$$+ \frac{(0,255 \angle 83,3^\circ \Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot 4,355 \cdot 10^{-6} \angle 89,8^\circ \text{S} \cdot \text{km}^{-1})^2 \cdot 300^4 \text{km}}{120} +$$

$$+ \frac{(0,255 \angle 83,3^\circ \Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot 4,355 \cdot 10^{-6} \angle 89,8^\circ \text{S} \cdot \text{km}^{-1})^4 \cdot 300^6 \text{km}}{5040} +$$

$$\left. + \frac{(0,255 \angle 83,3^\circ \Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot 4,355 \cdot 10^{-6} \angle 89,8^\circ \text{S} \cdot \text{km}^{-1})^6 \cdot 300^8 \text{km}}{362880} \right]$$

$$\mathbf{C} = (2,0083 + j1285,031) \cdot 10^{-6} \text{S} = 1,285 \cdot 10^{-3} \angle 89,91^\circ \text{S}$$

Pro větší přesnost bylo použito součtu prvních pěti členů rozvoje hyperbolických funkcí \sinh a \cosh .

Pro úplnost ještě určíme celkovou podélnou impedanci a příčnou admitanci zadaného vedení

$$\mathbf{Z}_l = \mathbf{Z}_k l = (0,0298 + j0,253)\Omega \cdot \text{km}^{-1} \cdot 300\text{km}$$

$$\mathbf{Z}_l = (8,94 + j75,9)\Omega = 76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega,$$

$$\mathbf{Y}_q = \mathbf{Y}_k \cdot l = (0,0156 + j4,355) \cdot 10^{-6} \text{S} \cdot \text{km}^{-1} \cdot 300\text{km}$$

$$\mathbf{Y}_q = (4,68 + j1306,5) \cdot 10^{-6} \text{S} = 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S}.$$

Nyní provedeme výpočet poměrů na začátku vedení pomocí základních rovnic (4.34) a (4.35). Toto řešení považujeme za přesné a vypočtené hodnoty budou sloužit jako referenční, pro závěrečné porovnávání výsledků použitých metod řešení.

Fázor proudu na začátku vedení určíme z rovnice (4.34)

$$\mathbf{I}_1 = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V} \cdot 1,285 \cdot 10^{-3} \angle 89,91^\circ \text{S} + 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{A} \cdot 0,9509 \angle 0,36^\circ$$

$$\mathbf{I}_1 = (482,2599 + j67,1064) \text{A} = 486,9065 \angle 7,92^\circ \text{A}.$$

Fázor fázového napětí na začátku vedení určíme z rovnice (4.35)

$$\mathbf{U}_{f1} = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V} \cdot 0,9509 \angle 0,36^\circ + 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{A} \cdot 75,1685 \angle 83,4^\circ \Omega$$

$$\mathbf{U}_{f1} = (242223,5944 + j36974,0872) \text{V} = 245029,2897 \angle 8,68^\circ \text{V} \doteq 245,0293 \angle 8,68^\circ \text{kV}.$$

Sdružená hodnota napětí na začátku vedení potom bude

$$\mathbf{U}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_{f1} = \sqrt{3} \cdot 245029,2897 \angle 8,68^\circ \text{V}$$

$$\mathbf{U}_1 = (419543,5722 + j64040,9976) \text{V} = 424403,179 \angle 8,68^\circ \text{V} \doteq 424,4032 \angle 8,68^\circ \text{kV}.$$

Komplexní výkon na začátku vedení vypočteme

$$\mathbf{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_1 \cdot \mathbf{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 424403,179 \angle 8,68^\circ \text{V} \cdot 486,9065 \angle -7,92^\circ \text{A}$$

$$\mathbf{S}_1 = (357,8878 + j4,7291) \text{MVA} = 357,919 \angle 0,76^\circ \text{MVA}.$$

Z komplexního výkonu dále určíme činný, jalový a zdánlivý výkon na začátku vedení

$$P_1 = \text{Re}\{\mathbf{S}_1\}$$

$$P_1 = 357,8878 \text{MW},$$

$$Q_1 = \text{Im}\{\mathbf{S}_1\}$$

$$Q_1 = 4,7291 \text{MVAr},$$

$$S_1 = |\mathbf{S}_1|$$

$$S_1 = 357,919 \text{MVA}.$$

Účinník na začátku vedení potom bude

$$\cos \varphi_1 = \cos \left(\arctan \left(\frac{Q_1}{P_1} \right) \right) = \cos \left(\arctan \left(\frac{4,7291 \cdot 10^6 \text{VAr}}{357,8878 \cdot 10^6 \text{W}} \right) \right)$$

$$\cos \varphi_1 = 0,9999$$

a účinnost přenosu

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{350 \cdot 10^6 \text{W}}{357,8878 \cdot 10^6 \text{W}} \cdot 100 = 97,796\%.$$

10 PŘIBLIŽNÝ VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU VEDENÍ

Přibližným řešením máme namysli řešení vedení se soustředěnými parametry resp. řešení pomocí náhradních dvojbranů. Zadané vedení budeme postupně nahrazovat dvojbrany z kapitoly 5 a u každého dvojbranu provedeme jak řešení postupné, tak i řešení pomocí Blondelových konstant článků a postupných kaskádních rovnic dvojbranu.

10.1 Řešení pomocí π -článku

Při řešení budeme uvažovat symetrický π -článek, jehož schéma zapojení je uvedeno v kapitole 5.1 na obrázku (Obr.5-2).

10.1.1 Postupné řešení

Pro symetrický π -článek platí:

$$\mathbf{Y}_{qa} = \mathbf{Y}_{qb} = \frac{\mathbf{Y}_q}{2} = \frac{1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S}}{2}$$

$$\mathbf{Y}_{qa} = \mathbf{Y}_{qb} = (2,3943 + j653,2456) \cdot 10^{-6} \text{S} = 0,6533 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S}$$

- proud příčnou větví na výstupu článku

$$\mathbf{I}_{qb} = \mathbf{U}_{f2} \cdot \mathbf{Y}_{qb} = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V} \cdot 0,6533 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S}$$

$$\mathbf{I}_{qb} = (0,5404 + j150,8616) \text{A} = 150,8626 \angle 89,79^\circ \text{A}$$

- proud tekoucí podélnou impedancí

$$\mathbf{I}_3 = \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_{qb} = 561,3152 \angle -28,84^\circ \text{A} + 150,8626 \angle 89,79^\circ \text{A}$$

$$\mathbf{I}_3 = (505,7219 - j93,8146) \text{A} = 514,3499 \angle -10,51^\circ \text{A}$$

- úbytek napětí na podélné impedanci

$$\Delta \mathbf{U}_l = \mathbf{I}_3 \cdot \mathbf{Z}_l = 514,3499 \angle -10,51^\circ \text{A} \cdot 76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega$$

$$\Delta \mathbf{U}_l = (11641,68 + j150,8616) \text{V} = 39309,0325 \angle 72,77^\circ \text{V} \doteq 39,309 \angle 72,77^\circ \text{kV}$$

- fázové napětí na začátku vedení

$$\mathbf{U}_{f1} = \mathbf{U}_{f2} + \Delta \mathbf{U}_l = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V} + 39309,0325 \angle 72,77^\circ \text{V}$$

$$\mathbf{U}_{f1} = (242581,7877 + j37545,5899) \text{V} = 245470,151 \angle 8,8^\circ \text{V} \doteq 245,4702 \angle 8,8^\circ \text{kV}$$

- proud tekoucí příčnou větví na vstupu článku

$$\mathbf{I}_{qa} = \mathbf{U}_{f1} \cdot \mathbf{Y}_{qa} = 245470,151 \angle 8,8^\circ \text{V} \cdot 0,6533 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S}$$

$$\mathbf{I}_{qa} = (-23,959 + j158,5544) \text{A} = 160,3544 \angle 98,59^\circ \text{A}$$

- proud na začátku vedení

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_3 + \mathbf{I}_{qa} = 514,3499 \angle -10,51^\circ \text{A} + 160,3544 \angle 98,59^\circ \text{A}$$

$$\mathbf{I}_1 = (481,7629 + j64,7398) \text{A} = 486,0933 \angle 7,65^\circ \text{A}$$

- sdružené napětí na začátku vedení

$$\mathbf{U}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_{f1} = \sqrt{3} \cdot 245470,151 \angle 8,8^\circ \text{V}$$

$$\mathbf{U}_1 = (420163,9813 + j65030,8693) \text{V} = 425166,7733 \angle 8,8^\circ \text{V} \doteq 425,1668 \angle 8,8^\circ \text{kV}$$

- komplexní výkon na začátku vedení

$$\mathbf{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_1 \cdot \mathbf{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 425166,7733 \angle 8,8^\circ \text{V} \cdot 486,0933 \angle -7,65^\circ \text{A}$$

$$\mathbf{S}_1 = (357,8928 + j7,1501) \text{MVA} = 357,9642 \angle 1,14^\circ \text{MVA}.$$

- činný, jalový a zdánlivý výkon na začátku vedení

$$P_1 = \text{Re}\{\mathbf{S}_1\}$$

$$P_1 = 357,8928 \text{MW}$$

$$Q_1 = \text{Im}\{\mathbf{S}_1\}$$

$$Q_1 = 7,1501 \text{MVAr}$$

$$S_1 = |\mathbf{S}_1|$$

$$S_1 = 357,9642 \text{MVA}$$

- účinník na začátku vedení

$$\cos \varphi_1 = \cos \left(\arctan \left(\frac{Q_1}{P_1} \right) \right) = \cos \left(\arctan \left(\frac{7,1501 \cdot 10^6 \text{MVAr}}{357,8928 \cdot 10^6 \text{MW}} \right) \right)$$

$$\cos \varphi_1 = 0,9998$$

- účinnost přenosu

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{350 \cdot 10^6 \text{W}}{357,8928 \cdot 10^6 \text{W}} \cdot 100 = 97,7946\%$$

10.1.2 Výpočet pomocí Blondelových konstant π -článku

Do vztahů pro Blondelovy konstanty symetrického π -článku (5.11) dosadíme patřičné hodnoty, vypočteme a takto získané hodnoty Blondelových konstant dosadíme do postupné kaskádní matice dvojbranu (5.1) z čehož získáme napětí a proud na začátku vedení.

- Blondelovy konstanty π -článku

$$\mathbf{A}_\pi = \mathbf{D}_\pi = 1 + \frac{1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S} \cdot 76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega}{2}$$

$$\mathbf{A}_\pi = \mathbf{D}_\pi = (950,4392 + j6,0177) \cdot 10^{-3} = 0,9505 \angle 0,36^\circ$$

$$\mathbf{B}_\pi = \mathbf{Z}_l = (8,94 + j75,9) \Omega = 76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega$$

$$\mathbf{C}_\pi = 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S} + \frac{76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega \cdot (1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S})^2}{4}$$

$$\mathbf{C}_\pi = (0,633 + j1274,1385) \cdot 10^{-6} \text{S} = 1,2741 \cdot 10^{-3} \angle 89,97^\circ \text{S}$$

- proud na začátku vedení

$$\mathbf{I}_1 = 1,2741 \cdot 10^{-3} \angle 89,97^\circ \text{S} \cdot 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V} + 0,9505 \angle 0,36^\circ \cdot 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{A}$$

$$\mathbf{I}_1 = (481,7629 + j64,7399) \text{A} = 486,0933 \angle 7,65^\circ \text{A}$$

- fázové napětí na začátku vedení

$$\mathbf{U}_{f1} = 0,9505 \angle 0,36^\circ \cdot 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V} + 76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega \cdot 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{A}$$

$$\mathbf{U}_{f1} = (242581,7774 + j37545,5989) \text{V} = 245470,1422 \angle 8,8^\circ \text{V} = 245,4701 \angle 8,8^\circ \text{kV}.$$

- sdružené napětí na začátku vedení potom bude

$$\mathbf{U}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_{f1} = \sqrt{3} \cdot 245470,1422 \angle 8,8^\circ \text{V}$$

$$\mathbf{U}_1 = (420163,9634 + j65030,8849) \text{V} = 425166,7581 \angle 8,8^\circ \text{V} = 425,1668 \angle 8,8^\circ \text{kV}$$

- komplexní výkon na začátku vedení

$$\mathbf{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_1 \cdot \mathbf{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 425166,7581 \angle 8,8^\circ \text{V} \cdot 486,0933 \angle -7,65^\circ \text{A}$$

$$\mathbf{S}_1 = (357,8928 + j7,1501) \text{MVA} = 357,9642 \angle 1,14^\circ \text{MVA}$$

- činný, jalový a zdánlivý výkon na začátku vedení

$$P_1 = \text{Re}\{\mathbf{S}_1\}$$

$$P_1 = 357,8928 \text{MW}$$

$$Q_1 = \text{Im}\{\mathbf{S}_1\}$$

$$Q_1 = 7,1501 \text{MVAr}$$

$$S_1 = |\mathbf{S}_1|$$

$$S_1 = 357,9642 \text{MVA}$$

- účinník na začátku vedení

$$\cos \varphi_1 = \cos \left(\arctan \left(\frac{Q_1}{P_1} \right) \right) = \cos \left(\arctan \left(\frac{7,1501 \cdot 10^6 \text{VAr}}{357,8928 \cdot 10^6 \text{W}} \right) \right)$$

$$\cos \varphi_1 = 0,9998$$

- účinnost přenosu

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{350 \cdot 10^6 \text{W}}{357,8928 \cdot 10^6 \text{W}} \cdot 100 = 97,7946\%$$

10.2 Řešení pomocí T-článku

Uvažujeme symetrický T-článek, jehož schéma zapojení je uvedeno v kapitole 5.2 na obrázku (Obr.5-5).

10.2.1 Postupné řešení

Pro symetrický T-článek platí:

$$\mathbf{Z}_{1a} = \mathbf{Z}_{1b} = \frac{\mathbf{Z}_1}{2} = \frac{76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega}{2}$$

$$\mathbf{Z}_{1a} = \mathbf{Z}_{1b} = (4,4715 + j37,9498) \Omega = 38,2124 \angle 83,28^\circ \Omega$$

- úbytek napětí na podélné impedanci na výstupu článku

$$\Delta \mathbf{U}_{1b} = \mathbf{I}_2 \cdot \mathbf{Z}_{1b} = 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{A} \cdot 38,2124 \angle 83,28^\circ \Omega$$

$$\Delta \mathbf{U}_{1b} = (11543,6231 + j18077,9353) \text{V} = 21449,172 \angle 57,44^\circ \text{V}$$

- napětí na příčné větvi T-článku

$$\mathbf{U}_q = \mathbf{U}_{f2} + \Delta \mathbf{U}_{lb} = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V} + 21449,172 \angle 57,44^\circ \text{V}$$

$$\mathbf{U}_q = (242483,7308 + j18077,9353) \text{V} = 243156,6808 \angle 4,26^\circ \text{V} = 243,1567 \angle 4,26^\circ \text{kV}$$

- proud příčnou větví

$$\mathbf{I}_q = \mathbf{U}_q \cdot \mathbf{Y}_q = 243156,6808 \angle 4,26^\circ \text{V} \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S}$$

$$\mathbf{I}_q = (-22,484 + j316,8896) \text{A} = 317,6862 \angle 94,06^\circ \text{A}$$

- proud na začátku vedení

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_q = 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{A} + 317,6862 \angle 94,06^\circ \text{A}$$

$$\mathbf{I}_1 = (482,6975 + j72,2134) \text{A} = 488,0693 \angle 8,51^\circ \text{A}$$

- úbytek napětí na podélné impedanci na vstupu článku

$$\Delta \mathbf{U}_{la} = \mathbf{I}_1 \cdot \mathbf{Z}_{la} = 488,0693 \angle 8,51^\circ \text{A} \cdot 38,2124 \angle 83,28^\circ \Omega$$

$$\Delta \mathbf{U}_{la} = (-582,8407 + j18641,1641) \text{V} = 18650,2735 \angle 8,63^\circ \text{V} \doteq 18,6503 \angle 8,63^\circ \text{kV}$$

- fázové napětí na začátku vedení

$$\mathbf{U}_{f1} = \mathbf{U}_q + \Delta \mathbf{U}_{la} = 243156,6808 \angle 4,26^\circ \text{V} + 18650,2735 \angle 8,63^\circ \text{V}$$

$$\mathbf{U}_{f1} = (241900,8901 + j36719,0994) \text{V} = 244671,8883 \angle 8,63^\circ \text{V} \doteq 244,6719 \angle 8,63^\circ \text{kV}$$

- sdružená hodnota napětí na začátku vedení

$$\mathbf{U}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_{f1} = \sqrt{3} \cdot 244671,8883 \angle 8,63^\circ \text{V}$$

$$\mathbf{U}_1 = (418984,6321 + j63599,3457) \text{V} = 423784,1417 \angle 8,63^\circ \text{V} \doteq 423,7841 \angle 8,63^\circ \text{kV}$$

- komplexní výkon na začátku vedení

$$\mathbf{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_1 \cdot \mathbf{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 423784,1417 \angle 8,63^\circ \text{V} \cdot 488,0693 \angle -8,51^\circ \text{A}$$

$$\mathbf{S}_1 = (358,2497 + j0,7672) \text{MVA} = 358,2505 \angle 0,12^\circ \text{MVA}$$

- činný, jalový a zdánlivý výkon na začátku vedení

$$P_1 = \text{Re}\{\mathbf{S}_1\}$$

$$P_1 = 358,2497 \text{MW}$$

$$Q_1 = \text{Im}\{\mathbf{S}_1\}$$

$$Q_1 = 0,7672 \text{MVAr}$$

$$S_1 = |\mathbf{S}_1|$$

$$S_1 = 358,2505 \text{MVA}$$

- účinník na začátku vedení

$$\cos \varphi_1 = \cos \left(\arctan \left(\frac{Q_1}{P_1} \right) \right) = \cos \left(\arctan \left(\frac{0,7672 \cdot 10^6 \text{VAr}}{358,2497 \cdot 10^6 \text{W}} \right) \right)$$

$$\cos \varphi_1 = 1$$

- účinnost přenosu

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{350 \cdot 10^6 \text{W}}{358,2497 \cdot 10^6 \text{W}} \cdot 100 = \underline{\underline{97,6972\%}}$$

10.2.2 Řešení pomocí Blondelových konstant T-článku

Ze vztahu (5.18) vypočteme Blondelovy konstanty T-článku, dosadíme do postupné kaskádní matice dvojbranu (5.1) a vypočteme poměry na začátku vedení.

- Blondelovy konstanty T-článku

$$\mathbf{A}_T = \mathbf{D}_T = 1 + \frac{76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S}}{2}$$

$$\mathbf{A}_T = \mathbf{D}_T = (950,4392 + j6,0177) \cdot 10^{-3} = 0,9505 \angle 0,36^\circ$$

$$\mathbf{B}_T = 76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega + \frac{(76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega)^2 \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S}}{4}$$

$$\mathbf{B}_T = (8,4901 + j74,0461) \Omega = 74,5312 \angle 83,46^\circ \Omega$$

$$\mathbf{C}_T = \mathbf{Y}_q = (4,68 + j1306,5) \cdot 10^{-6} \text{S} = 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S}$$

- proud na začátku vedení

$$\mathbf{I}_1 = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V} \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S} + 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{A} \cdot 0,9505 \angle 0,36^\circ$$

$$\mathbf{I}_1 = (482,6975 + j72,2134) \text{A} = 488,0693 \angle 8,51^\circ \text{A}$$

- fázové napětí na začátku vedení

$$\mathbf{U}_{f1} = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V} \cdot 0,9505 \angle 0,36^\circ + 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{A} \cdot 74,5312 \angle 83,46^\circ \Omega$$

$$\mathbf{U}_{f1} = (241900,891 + j36719,1228) \text{V} = 244671,8926 \angle 8,63^\circ \text{V} \doteq 244,6719 \angle 8,63^\circ \text{kV}$$

- sdružená hodnota napětí na začátku vedení

$$\mathbf{U}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_{f1} = \sqrt{3} \cdot 244671,8926 \angle 8,63^\circ \text{V}$$

$$\mathbf{U}_1 = (418984,6336 + j63599,3863) \text{V} = 423784,1492 \angle 8,63^\circ \text{V} \doteq 423,7841 \angle 8,63^\circ \text{kV}$$

- komplexní výkon na začátku vedení

$$\mathbf{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_1 \cdot \mathbf{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 423784,1492 \angle 8,63^\circ \text{V} \cdot 488,0693 \angle -8,51^\circ \text{A}$$

$$\mathbf{S}_1 = (358,2497 + j0,7672) \text{MVA} = 358,2505 \angle 0,12^\circ \text{MVA}$$

- činný, jalový a zdánlivý výkon na začátku vedení

$$P_1 = \text{Re}\{\mathbf{S}_1\}$$

$$P_1 = 358,2497 \text{MW}$$

$$Q_1 = \text{Im}\{\mathbf{S}_1\}$$

$$Q_1 = 0,7672 \text{MVAr}$$

$$S_1 = |\mathbf{S}_1|$$

$$S_1 = 358,2505 \text{MVA}$$

- účinník na začátku vedení

$$\cos \varphi_1 = \cos \left(\arctan \left(\frac{Q_1}{P_1} \right) \right) = \cos \left(\arctan \left(\frac{0,7672 \cdot 10^6 \text{VAr}}{358,2497 \cdot 10^6 \text{W}} \right) \right)$$

$$\cos \varphi_1 = 1$$

- účinnost přenosu

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{350 \cdot 10^6 \text{ W}}{358,2497 \cdot 10^6 \text{ W}} \cdot 100 = \underline{\underline{97,6972\%}}$$

10.3 Řešení pomocí Γ -článku

Budeme vycházet ze schéma zapojení Γ -článku, které je uvedeno v kapitole 5.3 na obrázku (Obr.5-8 a) b)). Nejprve provedeme výpočet pro Γ -článek s příčnou větví na vstupu článku (Obr.5-8 a)) a poté uděláme výpočet pro Γ -článek s příčnou větví na výstupu článku (Obr.5-8 b)).

10.3.1 Řešení pomocí Γ -článku s příčnou větví na vstupu článku

V následujících výpočtech se budeme řídit podle schéma zapojení článku na obrázku (Obr.5-8 a)).

10.3.1.1 Postupné řešení

- úbytek napětí na podélné impedanci

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{U}_l &= \mathbf{I}_2 \cdot \mathbf{Z}_l = 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{ A} \cdot 76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega \\ \Delta \mathbf{U}_l &= (23087,2462 + j36155,8706) \text{ V} = 42898,344 \angle 57,44^\circ \text{ V} = 42,8983 \angle 57,44^\circ \text{ kV} \end{aligned}$$

- fázové napětí na začátku vedení

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{f1} &= \mathbf{U}_{f2} + \Delta \mathbf{U}_l = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{ V} + 42898,344 \angle 57,44^\circ \text{ V} \\ \mathbf{U}_{f1} &= (254027,3539 + j36155,8706) \text{ V} = 256587,4968 \angle 8,1^\circ \text{ V} \doteq 256,5875 \angle 8,1^\circ \text{ kV} \end{aligned}$$

- proud tekoucí příčnou větví článku

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_q &= \mathbf{U}_{f1} \cdot \mathbf{Y}_q = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{ V} \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{ S} \\ \mathbf{I}_q &= (-46,0488 + j332,0559) \text{ A} = 335,2337 \angle 97,9^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

- proud na začátku vedení

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_1 &= \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_q = 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{ A} + 335,2337 \angle 97,9^\circ \text{ A} \\ \mathbf{I}_1 &= (459,1327 + j87,3797) \text{ A} = 467,3736 \angle 10,78^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

- sdružené napětí na začátku vedení

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_1 &= \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_{f1} = \sqrt{3} \cdot 256587,4968 \angle 8,1^\circ \text{ V} \\ \mathbf{U}_1 &= (439988,2835 + j62623,8049) \text{ V} = 444422,581 \angle 8,1^\circ \text{ V} \doteq 444,4226 \angle 8,1^\circ \text{ kV} \end{aligned}$$

- komplexní výkon na začátku vedení

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_1 &= \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_1 \cdot \mathbf{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 444422,581 \angle 8,1^\circ \text{ V} \cdot 467,3736 \angle -10,78^\circ \text{ A} \\ \mathbf{S}_1 &= (359,3747 - j16,7895) \text{ MVA} = 359,7666 \angle -2,67^\circ \text{ MVA} \end{aligned}$$

- činný, jalový a zdánlivý výkon na začátku vedení

$$\begin{array}{lll} P_1 = \operatorname{Re}\{\mathbf{S}_1\} & Q_1 = \operatorname{Im}\{\mathbf{S}_1\} & S_1 = |\mathbf{S}_1| \\ \underline{P_1 = 359,3747\text{MW}} & \underline{Q_1 = -16,7895\text{MVAr}} & \underline{S_1 = 359,7666\text{MVA}} \end{array}$$

- účinník na začátku vedení

$$\cos\varphi_1 = \cos\left(\arctan\left(\frac{Q_1}{P_1}\right)\right) = \cos\left(\arctan\left(\frac{-16,7895 \cdot 10^6 \text{ VAr}}{359,3747 \cdot 10^6 \text{ W}}\right)\right)$$

$$\underline{\underline{\cos\varphi_1 = 0,9989}}$$

- účinnost přenosu

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{350 \cdot 10^6 \text{ W}}{359,3747 \cdot 10^6 \text{ W}} \cdot 100 = \underline{\underline{97,2853\%}}$$

10.3.1.2 Řešení pomocí Blondelových konstant

- Blondelovy konstanty Γ -článku s příčným prvkem na vstupu článku, podle vztahů (5.23)

$$\mathbf{A}_\Gamma = 1$$

$$\mathbf{B}_\Gamma = \mathbf{Z}_l = (8,94 + j75,9)\Omega = 76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega$$

$$\mathbf{C}_\Gamma = \mathbf{Y}_q = (4,68 + j1306,5) \cdot 10^{-6} \text{ S} = 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{ S}$$

$$\mathbf{D}_\Gamma = 1 + 76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{ S}$$

$$\mathbf{D}_\Gamma = (0,9009 + j0,12) = 0,901 \angle 0,77^\circ$$

- proud na začátku vedení

$$\mathbf{I}_1 = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{ V} \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{ S} + 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{ A} \cdot 0,901 \angle 0,77^\circ$$

$$\underline{\underline{\mathbf{I}_1 = (459,1327 + j87,3797)\text{A} = 467,3736 \angle 10,78^\circ \text{ A}}}$$

- fázové napětí na začátku vedení

$$\mathbf{U}_{f1} = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{ V} \cdot 1 + 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{ A} \cdot 76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega$$

$$\mathbf{U}_{f1} = (254027,3539 + j36155,8706)\text{V} = 256587,4968 \angle 8,1^\circ \text{ V} \doteq 256,5875 \angle 8,1^\circ \text{ kV}$$

- sdružené napětí na začátku vedení

$$\mathbf{U}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_{f1} = \sqrt{3} \cdot 256587,4968 \angle 8,1^\circ \text{ V}$$

$$\underline{\underline{\mathbf{U}_1 = (439988,2835 + j62623,8049)\text{V} = 444422,581 \angle 8,1^\circ \text{ V} \doteq 444,4226 \angle 8,1^\circ \text{ kV}}}$$

- komplexní výkon na začátku vedení

$$\mathbf{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_1 \cdot \mathbf{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 444422,581 \angle 8,1^\circ \text{ V} \cdot 467,3736 \angle -10,78^\circ \text{ A}$$

$$\underline{\underline{\mathbf{S}_1 = (359,3747 - j16,7895)\text{MVA} = 359,7666 \angle -2,67^\circ \text{ MVA}}}$$

- činný, jalový a zdánlivý výkon na začátku vedení

$$\begin{array}{lll} P_1 = \operatorname{Re}\{\mathbf{S}_1\} & Q_1 = \operatorname{Im}\{\mathbf{S}_1\} & S_1 = |\mathbf{S}_1| \\ \underline{P_1 = 359,3747\text{MW}} & \underline{Q_1 = -16,7895\text{MVAr}} & \underline{S_1 = 359,7666\text{MVA}} \end{array}$$

- účinník na začátku vedení

$$\cos \varphi_1 = \cos \left(\arctan \left(\frac{Q_1}{P_1} \right) \right) = \cos \left(\arctan \left(\frac{-16,7895 \cdot 10^6 \text{ VAr}}{359,3747 \cdot 10^6 \text{ W}} \right) \right)$$

$$\underline{\underline{\cos \varphi_1 = 0,9989}}$$

- účinnost přenosu

$$\underline{\underline{\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{350 \cdot 10^6 \text{ W}}{359,3747 \cdot 10^6 \text{ W}} \cdot 100 = 97,2853\%}}$$

10.3.2 Řešení pomocí Γ -článku s příčnou větví na výstupu článku

Níže uvedené výpočty vztahujeme ke schématu zapojení na obrázku (Obr.5-8 b)).

10.3.2.1 Postupné řešení

- proud příčnou větví dvojbranu

$$\mathbf{I}_q = \mathbf{U}_{f2} \cdot \mathbf{Y}_q = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{ V} \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_q = (1,0808 + j301,7233) \text{ A} = 301,7252 \angle 89,79^\circ \text{ A}$$

- proud na začátku vedení

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_q = 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{ A} + 301,7252 \angle 89,79^\circ \text{ A}$$

$$\underline{\underline{\mathbf{I}_1 = (506,2623 + j57,0471) \text{ A} = 509,4663 \angle 6,43^\circ \text{ A}}}$$

- úbytek napětí na podélné impedanci

$$\Delta \mathbf{U}_l = \mathbf{I}_1 \cdot \mathbf{Z}_l = 509,4663 \angle 6,43^\circ \text{ A} \cdot 76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega$$

$$\Delta \mathbf{U}_l = (196,1138 + j38935,3092) \text{ V} = 38935,8031 \angle 89,71^\circ \text{ V} \doteq 38,9358 \angle 89,71^\circ \text{ kV}$$

- fázové napětí na začátku vedení

$$\mathbf{U}_{f1} = \mathbf{U}_{f2} + \Delta \mathbf{U}_l = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{ V} + 38935,8031 \angle 89,71^\circ \text{ V}$$

$$\mathbf{U}_{f1} = (231136,2215 + j38935,3092) \text{ V} = 234392,6432 \angle 9,56^\circ \text{ V} \doteq 234,3926 \angle 89,71^\circ \text{ kV}$$

- sdružené napětí na začátku vedení

$$\mathbf{U}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_{f1} = \sqrt{3} \cdot 234392,6432 \angle 9,56^\circ \text{ V}$$

$$\underline{\underline{\mathbf{U}_1 = (400339,6791 + j67437,9337) \text{ V} = 405979,9669 \angle 9,56^\circ \text{ V} \doteq 405,98 \angle 9,56^\circ \text{ kV}}}$$

- komplexní výkon na začátku vedení

$$\mathbf{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_1 \cdot \mathbf{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 405979,9669 \angle 9,56^\circ \text{ V} \cdot 509,4663 \angle -6,43^\circ \text{ A}$$

$$\underline{\underline{\mathbf{S}_1 = (357,7101 + j19,5775) \text{ MVA} = 358,2454 \angle 3,13^\circ \text{ MVA}}}$$

- činný, jalový a zdánlivý výkon na začátku vedení

$$\begin{aligned} P_1 &= \operatorname{Re}\{\mathbf{S}_1\} & Q_1 &= \operatorname{Im}\{\mathbf{S}_1\} & S_1 &= |\mathbf{S}_1| \\ \underline{P_1} &= \underline{357,7101\text{MW}} & \underline{Q_1} &= \underline{19,5775\text{MVAr}} & \underline{S_1} &= \underline{358,2454\text{MVA}} \end{aligned}$$

- účinník na začátku vedení

$$\begin{aligned} \cos\varphi_1 &= \cos\left(\arctan\left(\frac{Q_1}{P_1}\right)\right) = \cos\left(\arctan\left(\frac{19,5775 \cdot 10^6 \text{ VAr}}{357,7101 \cdot 10^6 \text{ W}}\right)\right) \\ \underline{\cos\varphi_1} &= \underline{0,9985} \end{aligned}$$

- účinnost přenosu

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{350 \cdot 10^6 \text{ W}}{357,7101 \cdot 10^6 \text{ W}} \cdot 100 = \underline{97,8446\%}$$

10.3.2.2 Řešení pomocí Blondelových konstant

- Blondelovy konstanty Γ -článku s příčným prvkem na výstupu článku podle (5.28)

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_\Gamma &= 1 + 76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S} \\ \mathbf{A}_\Gamma &= (0,9009 + j0,012) = 0,901 \angle 0,77^\circ \\ \mathbf{B}_\Gamma &= \mathbf{Z}_l = (8,94 + j75,9) \Omega = 76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega \\ \mathbf{C}_\Gamma &= \mathbf{Y}_q = (4,68 + j1306,5) \cdot 10^{-6} \text{S} = 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S} \\ \mathbf{D}_\Gamma &= 1 \end{aligned}$$

- proud na začátku vedení

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_1 &= 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V} \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S} + 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{A} \cdot 1 \\ \underline{\mathbf{I}_1} &= \underline{(506,2623 + j57,0471)\text{A}} = \underline{509,4663 \angle 6,43^\circ \text{A}} \end{aligned}$$

- fázové napětí na začátku vedení

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{f1} &= 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V} \cdot 0,901 \angle 0,77^\circ + 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{A} \cdot 76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega \\ \underline{\mathbf{U}_{f1}} &= \underline{(231136,2215 + j38935,3092)\text{V}} = \underline{234392,6432 \angle 9,56^\circ \text{V}} \doteq \underline{234,3926 \angle 9,56^\circ \text{kV}} \end{aligned}$$

- sdružené napětí na začátku vedení

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_1 &= \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_{f1} = \sqrt{3} \cdot 234392,6432 \angle 9,56^\circ \text{V} \\ \underline{\mathbf{U}_1} &= \underline{(400339,6791 + j67437,9337)\text{V}} = \underline{405979,9669 \angle 9,56^\circ \text{V}} \doteq \underline{405,98 \angle 9,56^\circ \text{kV}} \end{aligned}$$

- komplexní výkon na začátku vedení

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_1 &= \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_1 \cdot \mathbf{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 405979,9669 \angle 9,56^\circ \text{V} \cdot 509,4663 \angle -6,43^\circ \text{A} \\ \underline{\mathbf{S}_1} &= \underline{(357,7101 + j19,5775)\text{MVA}} = \underline{358,2454 \angle 3,13^\circ \text{MVA}} \end{aligned}$$

- činný, jalový a zdánlivý výkon na začátku vedení

$$\begin{aligned} P_1 &= \operatorname{Re}\{\mathbf{S}_1\} & Q_1 &= \operatorname{Im}\{\mathbf{S}_1\} & S_1 &= |\mathbf{S}_1| \\ \underline{P_1} &= \underline{357,7101\text{MW}} & \underline{Q_1} &= \underline{19,5775\text{MVA}} & \underline{S_1} &= \underline{358,2454\text{MVA}} \end{aligned}$$

- účinník na začátku vedení

$$\begin{aligned} \cos\varphi_1 &= \cos\left(\arctan\left(\frac{Q_1}{P_1}\right)\right) = \cos\left(\arctan\left(\frac{19,5775 \cdot 10^6 \text{ VAr}}{357,7101 \cdot 10^6 \text{ W}}\right)\right) \\ \underline{\underline{\cos\varphi_1}} &= \underline{\underline{0,9985}} \end{aligned}$$

- účinnost přenosu

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{350 \cdot 10^6 \text{ W}}{357,7101 \cdot 10^6 \text{ W}} \cdot 100 = \underline{\underline{97,8446\%}}$$

10.4 Řešení pomocí Steinmetzova článku

Steinmetzův článek byl podrobněji rozebrán v kapitole 6.4. Výpočty budeme provádět podle schématu z této kapitoly na obrázku (Obr.6-9). Opět provedeme nejprve postupné řešení a poté řešení pomocí Blondelových konstant tohoto článku.

10.4.1 Postupné řešení

Pro Steinmetzův náhradní článek platí:

$$\mathbf{Z}_{la} = \mathbf{Z}_{lb} = \frac{\mathbf{Z}_l}{2} = \frac{76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega}{2}$$

$$\underline{\underline{\mathbf{Z}_{la} = \mathbf{Z}_{lb} = (4,4715 + j37,9498)\Omega = 38,2124 \angle 83,28^\circ \Omega}}$$

$$\mathbf{Y}_{qa} = \mathbf{Y}_{qc} = \frac{\mathbf{Y}_q}{6} = \frac{1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S}}{6}$$

$$\mathbf{Y}_{qa} = \mathbf{Y}_{qc} = (0,7981 + j217,7485) \cdot 10^{-6} \text{S} = 0,2178 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S}$$

$$\mathbf{Y}_{qb} = \frac{2\mathbf{Y}_q}{3} = \frac{2 \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \text{S}}{3}$$

$$\mathbf{Y}_{qb} = (3,1924 + j870,9941) \cdot 10^{-6} \text{S} = 0,871 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S}$$

- proud příčnou větví na výstupu článku

$$\mathbf{I}_{qc} = \mathbf{U}_{f2} \cdot \mathbf{Y}_{qc} = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V} \cdot 0,2178 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S}$$

$$\mathbf{I}_{qc} = (0,1801 + j50,2872) \text{A} = 50,2875 \angle 89,79^\circ \text{A}$$

- proud druhou podélnou impedancí od vstupu článku

$$\mathbf{I}_4 = \mathbf{I}_2 + \mathbf{I}_{qc} = 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{A} + 50,2875 \angle 89,79^\circ \text{A}$$

$$\mathbf{I}_4 = (505,3616 - j194,389) \text{A} = 541,4586 \angle -21,04^\circ \text{A}$$

- úbytek napětí na druhé podélné impedanci od vstupu článku

$$\Delta \mathbf{U}_{lb} = \mathbf{I}_4 \cdot \mathbf{Z}_{lb} = 541,4586 \angle -21,04^\circ \text{A} \cdot 38,2124 \angle 83,28^\circ \Omega$$

$$\Delta \mathbf{U}_{lb} = (9636,0287 + j18309,5552)\text{V} = 20690,4051 \angle 62,24^\circ \text{V} \doteq 20,6904 \angle 62,24^\circ \text{kV}$$

- napětí na prostřední příčné admitanci

$$\mathbf{U}_q = \mathbf{U}_{f2} + \Delta \mathbf{U}_{lb} = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V} + 20690,4051 \angle 62,24^\circ \text{V}$$

$$\mathbf{U}_q = (240576,1364 + j18309,5552)\text{V} = 241271,8741 \angle 4,35^\circ \text{V} \doteq 241,2719 \angle 4,35^\circ \text{kV}$$

- proud tekoucí prostřední příčnou admitancí

$$\mathbf{I}_{qb} = \mathbf{U}_q \cdot \mathbf{Y}_{qb} = 241271,8741 \angle 4,35^\circ \text{V} \cdot 0,871 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S}$$

$$\mathbf{I}_{qb} = (-15,197 + j209,5989)\text{A} = 210,1492 \angle 94,15^\circ \text{A}$$

- proud tekoucí první podélnou impedancí od vstupu článku

$$\mathbf{I}_3 = \mathbf{I}_4 + \mathbf{I}_{qb} = 541,4586 \angle -21,04^\circ \text{A} + 210,1492 \angle 94,15^\circ \text{A}$$

$$\mathbf{I}_3 = (490,1646 + j15,2099)\text{A} = 490,4005 \angle 1,78^\circ \text{A}$$

- úbytek napětí na první podélné admitanci od vstupu článku

$$\Delta \mathbf{U}_{la} = \mathbf{I}_3 \cdot \mathbf{Z}_{la} = 490,4005 \angle 1,78^\circ \text{A} \cdot 38,2124 \angle 83,28^\circ \Omega$$

$$\Delta \mathbf{U}_{la} = (1613,88184 + j18669,7341)\text{V} = 18739,3538 \angle 85,06^\circ \text{V} \doteq 18,7394 \angle 85,06^\circ \text{kV}$$

- fázové napětí na začátku vedení

$$\mathbf{U}_{f1} = \mathbf{U}_q + \Delta \mathbf{U}_{la} = 241271,8741 \angle 4,35^\circ \text{V} + 18739,3538 \angle 85,06^\circ \text{V}$$

$$\mathbf{U}_{f1} = (242189,9548 + j36979,2893)\text{V} = 244996,8205 \angle 8,68^\circ \text{V} \doteq 244,9968 \angle 8,68^\circ \text{kV}$$

- proud příčnou admitancí na vstupu článku

$$\mathbf{I}_{qa} = \mathbf{U}_{f1} \cdot \mathbf{Y}_{qa} = 244996,8205 \angle 8,68^\circ \text{V} \cdot 0,2178 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S}$$

$$\mathbf{I}_{qa} = (-7,8633 + j52,7657)\text{A} = 53,3484 \angle 98,48^\circ \text{A}$$

- proud na začátku vedení

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_3 + \mathbf{I}_{qa} = 490,4005 \angle 1,78^\circ \text{A} + 53,3484 \angle 98,48^\circ \text{A}$$

$$\mathbf{I}_1 = (482,3013 + j67,9756)\text{A} = 487,068 \angle 8,02^\circ \text{A}$$

- sdružené napětí na začátku vedení

$$\mathbf{U}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_{f1} = \sqrt{3} \cdot 244996,8205 \angle 8,68^\circ \text{V}$$

$$\mathbf{U}_1 = (419485,3068 + j64050,0078)\text{V} = 424346,9408 \angle 8,68^\circ \text{V} \doteq 424,3469 \angle 8,68^\circ \text{kV}$$

- komplexní výkon na začátku vedení

$$\mathbf{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_1 \cdot \mathbf{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 424346,9408 \angle 8,68^\circ \text{V} \cdot 487,068 \angle -8,02^\circ \text{A}$$

$$\mathbf{S}_1 = (357,9667 + j4,1165)\text{MVA} = 357,9903 \angle 0,66^\circ \text{MVA}$$

- činný, jalový a zdánlivý výkon na začátku vedení

$$\begin{array}{lll} P_1 = \operatorname{Re}\{\mathbf{S}_1\} & Q_1 = \operatorname{Im}\{\mathbf{S}_1\} & S_1 = |\mathbf{S}_1| \\ \underline{P_1 = 357,9667\text{MW}} & \underline{Q_1 = 4,1165\text{MVAr}} & \underline{S_1 = 357,9903\text{MVA}} \end{array}$$

- účinník na začátku vedení

$$\begin{aligned} \cos\varphi_1 &= \cos\left(\arctan\left(\frac{Q_1}{P_1}\right)\right) = \cos\left(\arctan\left(\frac{19,5775 \cdot 10^6 \text{ VAr}}{357,7101 \cdot 10^6 \text{ W}}\right)\right) \\ \underline{\underline{\cos\varphi_1 &= 0,9985}} \end{aligned}$$

- účinnost přenosu

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{350 \cdot 10^6 \text{ W}}{357,7101 \cdot 10^6 \text{ W}} \cdot 100 = \underline{\underline{97,8446\%}}$$

10.4.2 Výpočet pomocí Blondelových konstant

- Blondelovy konstanty Steinmetzova článku podle (5.29)

$$\mathbf{A}_{\text{St}} = 1 + \frac{76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{ S}}{2} + \frac{(76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{ S})^2}{36}$$

$$\mathbf{A}_{\text{St}} = (950,7081 + j5,9514) \cdot 10^{-3} = 0,9507 \angle 0,36^\circ$$

$$\mathbf{B}_{\text{St}} = \left(1 + \frac{76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{ S}}{6}\right) \cdot 76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega$$

$$\mathbf{B}_{\text{St}} = (8,6401 + j74,664) \Omega = 75,1623 \angle 83,4^\circ \Omega$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{\text{St}} &= \left[1 + \frac{5 \cdot 76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{ S}}{36} + \right. \\ &= \left. \frac{(76,4247 \angle 83,28^\circ \Omega \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{ S})^2}{216}\right] \cdot 1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{ S} \end{aligned}$$

$$\mathbf{C}_{\text{St}} = (2,4463 + j1288,5799) \cdot 10^{-6} \text{ S} = 1,2886 \cdot 10^{-3} \angle 89,89^\circ \text{ S}$$

$$\mathbf{D}_{\text{St}} = \mathbf{A}_{\text{St}} = (950,7081 + j5,9514) \cdot 10^{-3} = 0,9507 \angle 0,36^\circ$$

- proud na začátku vedení z rovnice (5.1)

$$\mathbf{I}_1 = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{ V} \cdot 1,2886 \cdot 10^{-3} \angle 89,89^\circ \text{ S} + 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{ A} \cdot 0,9507 \angle 0,36^\circ$$

$$\underline{\underline{\mathbf{I}_1 = (482,3013 + j67,9757) \text{ A} = 487,068 \angle 8,02^\circ \text{ A}}}$$

- fázové napětí na začátku vedení z rovnice (5.1)

$$\mathbf{U}_{f1} = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{ V} \cdot 0,9507 \angle 0,36^\circ + 561,3152 \angle -25,84^\circ \text{ A} \cdot 75,1623 \angle 83,4^\circ \Omega$$

$$\underline{\underline{\mathbf{U}_{f1} = (242189,9546 + j36979,2906) \text{ V} = 244996,8205 \angle 8,68^\circ \text{ V} \doteq 244,9968 \angle 8,68^\circ \text{ kV}}}$$

- sdružené napětí na začátku vedení

$$\mathbf{U}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_{f1} = \sqrt{3} \cdot 244996,8205 \angle 8,68^\circ \text{V}$$

$$\mathbf{U}_1 = (419485,3065 + j64050,0101) \text{V} = 424346,9408 \angle 8,68^\circ \text{V} \doteq \underline{\underline{424,3469 \angle 8,68^\circ \text{kV}}}$$

- komplexní výkon na začátku vedení

$$\mathbf{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_1 \cdot \mathbf{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 424346,9408 \angle 8,68^\circ \text{V} \cdot 487,068 \angle -8,02^\circ \text{A}$$

$$\mathbf{S}_1 = (357,9667 + j4,1164) \text{MVA} = 357,9903 \angle 0,66^\circ \text{MVA}$$

- činný, jalový a zdánlivý výkon na začátku vedení

$$P_1 = \text{Re}\{\mathbf{S}_1\}$$

$$\underline{\underline{P_1 = 357,9667 \text{MW}}}$$

$$Q_1 = \text{Im}\{\mathbf{S}_1\}$$

$$\underline{\underline{Q_1 = 4,1164 \text{MVAr}}}$$

$$S_1 = |\mathbf{S}_1|$$

$$\underline{\underline{S_1 = 357,9903 \text{MVA}}}$$

- účinník na začátku vedení

$$\cos \varphi_1 = \cos \left(\arctan \left(\frac{Q_1}{P_1} \right) \right) = \cos \left(\arctan \left(\frac{4,1164 \cdot 10^6 \text{VAr}}{357,9667 \cdot 10^6 \text{W}} \right) \right)$$

$$\underline{\underline{\cos \varphi_1 = 0,9999}}$$

- účinnost přenosu

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{350 \cdot 10^6 \text{W}}{357,9667 \cdot 10^6 \text{W}} \cdot 100 = \underline{\underline{97,7745\%}}$$

11 ZVLÁŠTNÍ PŘÍPADY CHODU VEDENÍ – VÝPOČET

11.1 Chod vedení naprázdno

Jak již bylo uvedeno v kapitole 6.1, chod vedení naprázdno je definován rovnicemi (6.4). Výpočet parametrů na začátku vedení při chodu naprázdno provedeme dosazením patřičných hodnot do rovnic (6.8) a (6.9). Uvažujeme že zadané jmenovité napětí je na konci vedení a je rovno napětí naprázdno, tedy

$$\mathbf{U}_{20} = \mathbf{U}_n = 400 \angle 0^\circ \text{kV}.$$

Fázové hodnota napětí na prázdno potom bude

$$\mathbf{U}_{f20} = \frac{\mathbf{U}_{20}}{\sqrt{3}} = \frac{400000 \angle 0^\circ \text{V}}{\sqrt{3}} = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V}$$

- proud na začátku vedení při chodu naprázdno

$$\mathbf{I}_{10} = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V} \cdot 1,285 \cdot 10^{-3} \angle 89,91^\circ \text{S}$$

$$\mathbf{I}_{10} = (0,6438 + j296,7652) \text{A} = 296,7656 \angle 89,91^\circ \text{A}$$

- fázové napětí na začátku vedení při chodu naprázdno

$$\mathbf{U}_{f10} = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V} \cdot 0,9509 \angle 0,36^\circ$$

$$\mathbf{U}_{f10} = (219587,6924 + j1366,7497) \text{V} = 219591,9458 \angle 0,36^\circ \text{V} \doteq 219,5919 \angle 0,36^\circ \text{kV}$$

- sdružené napětí na začátku vedení při chodu naprázdno

$$\mathbf{U}_{10} = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_{f10} = \sqrt{3} \cdot 219591,9458 \angle 0,36^\circ \text{V}$$

$$\mathbf{U}_{10} = (380337,04 + j2367,28) \text{V} = 380344,4071 \angle 0,36^\circ \doteq 380,3444 \angle 0,36^\circ \text{kV}$$

- komplexní výkon na začátku vedení při chodu naprázdno

$$\mathbf{S}_1 = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_1 \cdot \mathbf{I}_1^* = \sqrt{3} \cdot 380344,4071 \angle 0,36^\circ \text{V} \cdot 296,7656 \angle -89,91^\circ \text{A}$$

$$\mathbf{S}_1 = (1,5223 - j195,4961) \text{MVA} = 195,502 \angle -89,55^\circ \text{MVA}$$

- činný, jalový a zdánlivý výkon na začátku vedení

$$P_1 = \text{Re}\{\mathbf{S}_1\}$$

$$P_1 = 1,5223 \text{MW}$$

$$Q_1 = \text{Im}\{\mathbf{S}_1\}$$

$$Q_1 = 195,4961 \text{MVAr}$$

$$S_1 = |\mathbf{S}_1|$$

$$S_1 = 195,502 \text{MVA}$$

- účinník na začátku vedení při chodu naprázdno

$$\cos \varphi_1 = \cos \left(\arctan \left(\frac{Q_1}{P_1} \right) \right) = \cos \left(\arctan \left(\frac{195,4961 \cdot 10^6 \text{ VAr}}{1,5223 \cdot 10^6 \text{ W}} \right) \right)$$

$$\cos \varphi_1 = 0,0078$$

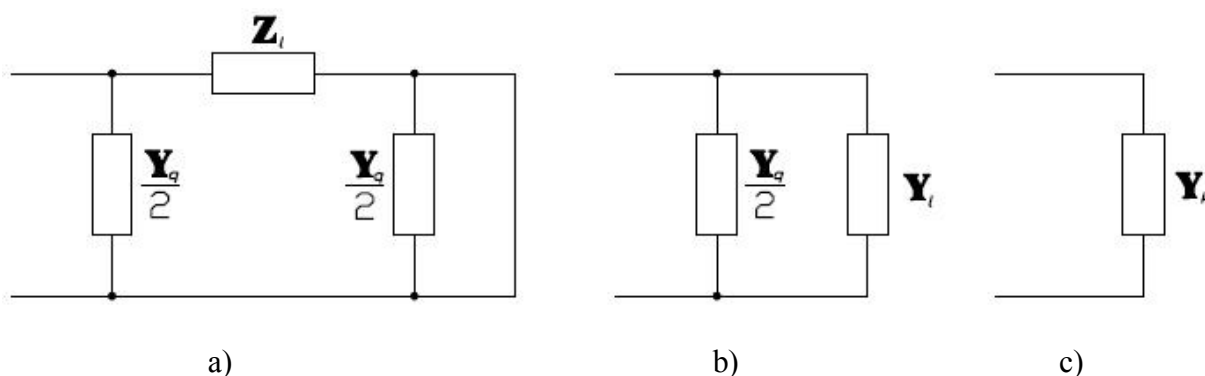
- impedance vedení naprázdno podle (6.10)

$$\mathbf{Z}_{10} = \frac{0,9509 \angle 0,36^\circ}{1,285 \cdot 10^{-3} \angle 89,91^\circ \text{S}}$$

$$\mathbf{Z}_{10} = \underline{\underline{(5,7619 - j739,9285)\Omega = 739,9509 \angle -89,55^\circ \Omega.}}$$

11.2 Chod vedení nakrátko

Chod vedení nakrátko je definován rovnicemi (6.11). Při výpočtu tohoto stavu ovšem nelze použít odvozené rovnice z kapitoly 6.2. Proud nakrátko na konci vedení je pro nás v tomto případě neznámý. Pro řešení tedy použijeme náhradu vedení π -článkem za předpokladu že napětí nakrátko na začátku vedení bude rovno napětí jmenovitému. Náhradní článek budeme poté postupně zjednodušovat podle schémat na obrázku (Obr.11-1).



Obr.11-1 Náhradní schéma pro chod nakrátko

Napětí nakrátko na začátku vedení tedy bude

$$\mathbf{U}_{1k} = \mathbf{U}_n = 400 \angle 0^\circ \text{kV}$$

a jeho fázová hodnota potom bude

$$\mathbf{U}_{f1k} = \frac{\mathbf{U}_{1k}}{\sqrt{3}} = \frac{400000 \angle 0^\circ \text{V}}{\sqrt{3}} = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V}.$$

Vedení nahradíme π -článkem, jehož schéma zapojení je na obrázku (Obr.11-1 a)). π -článek má podélnou impedanci

$$\mathbf{Z}_l = (8,94 + j75,9)\Omega = (R_l + jX_l)$$

a příčnou admitanci na vstupu a výstupu článku

$$\frac{\mathbf{Y}_q}{2} = \frac{1,3065 \cdot 10^{-3} \angle 89,79^\circ \text{S}}{2} = (2,3943 + j653,2456) \cdot 10^{-6} \text{S} = (G_q + jB_q).$$

Příčná admitance na výstupu článku je zkratována, tudíž s ní nepočítáme. Na obrázku (Obr.11-1 b)) je náhradní schéma zjednodušeno a to tak, že k podélné impedanci \mathbf{Z}_l vytvoříme odpovídající příčnou admitanci

$$\mathbf{Y}_l = \frac{1}{(R_l + jX_l)} = \frac{1}{(8,94 + j75,9)\Omega} = (1,5306 - j12,9949) \cdot 10^{-3} \text{S} = (G_l + jB_l).$$

Tyto dvě příčné admitance nakonec sečteme a dostaneme admitanci obvodu nakrátko, což odpovídá schématu na obrázku (Obr.11-1c)). Její velikost tedy je

$$\mathbf{Y}_k = \frac{\mathbf{Y}_q}{2} + \mathbf{Y}_l = (2,3943 + j653,2456) \cdot 10^{-6} \text{ S} + (1,5306 - j12,9949) \cdot 10^{-3} \text{ S}$$

$$\mathbf{Y}_k = (1,5329 - j12,3417) \cdot 10^{-3} \text{ S} = (G_k + jB_k)$$

Známe-li admitanci nakrátko určíme jednoduše činou a jalovou složku proudu nakrátko na začátku vedení. Činný proud na začátku vedení při chodu nakrátko bude

$$I_{1\check{k}} = U_{f1} \cdot G_k = 230940,1077 \text{ V} \cdot 1,5306 \cdot 10^{-3} \text{ S} = 354,0081 \text{ A}$$

a jalový proud při chodu nakrátko na začátku vedení

$$I_{1jk} = U_{f1} \cdot B_k = 230940,1077 \text{ V} \cdot (-12,9949 \cdot 10^{-3} \text{ S}) = -2850,1935 \text{ A}.$$

Fázor proudu na začátku vedení při chodu nakrátko potom bude

$$\mathbf{I}_{1k} = (I_{1\check{k}} + jI_{1jk}) = (354,0081 - j2850,1935) \text{ A} = 2872,0941 \angle -82,91^\circ \text{ A}.$$

Komplexní výkon na začátku vedení při chodu nakrátko:

$$\mathbf{S}_{1k} = 3 \cdot \mathbf{U}_{f1k} \cdot \mathbf{I}_{1k}^* = 3 \cdot 230940,1077 \angle 0^\circ \text{ V} \cdot 2872,0941 \angle 82,91^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{S}_{1k} = (245,264 - j1974,672) \text{ MVA} = 1989,8452 \angle -82,92^\circ \text{ MVA}.$$

Činný, jalový a zdánlivý výkon na začátku vedení při chodu nakrátko

$$\begin{array}{lll} P_{1k} = \text{Re}\{\mathbf{S}_{1k}\} & Q_{1k} = \text{Im}\{\mathbf{S}_{1k}\} & S_{1k} = |\mathbf{S}_{1k}| \\ \underline{P_{1k} = 245,264 \text{ MW}} & \underline{Q_{1k} = -1974,672 \text{ MVAr}} & \underline{S_{1k} = 1989,8452 \text{ MVA}} \end{array}$$

Činný výkon na začátku vedení při chodu nakrátko představuje ztráty nakrátko ΔP_{z1k} .

Účinnost na začátku vedení při chodu nakrátko

$$\cos \varphi_{1k} = \cos \left(\arctan \left(\frac{Q_{1k}}{P_{1k}} \right) \right) = \cos \left(\arctan \left(\frac{-1974,672 \cdot 10^6 \text{ VA} \cdot \text{r}}{245,264} \right) \right)$$

$$\underline{\underline{\cos \varphi_{1k} = 0,1233.}}$$

Na závěr ještě určíme impedanci vedení nakrátko ze vztahu (6.17).

$$\underline{\underline{\mathbf{Z}_{1k} = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{A}} = \frac{75,1685 \angle 83,4^\circ \Omega}{0,9509 \angle 0,36^\circ} = (9,579 + j78,4673) \Omega = 79,0498 \angle 83,04^\circ \Omega}}}$$

11.3 Chod vedení s přirozeným výkonem

Tento případ ustáleného chodu vedení byl podrobně rozebrán v kapitole 6.3. Nyní provedeme podle výše odvozených rovnic výpočet tohoto stavu. Předpokládáme, že napětí na konci vedení při chodu vedení s přirozeným výkonem bude rovno napětí jmenovitému, tedy

$$\mathbf{U}_{2p} = \mathbf{U}_n = 400 \angle 0^\circ \text{ kV}$$

s fázovou hodnotou

$$\mathbf{U}_{f2p} = 230940,1077 \angle 0^\circ \text{V}.$$

- přirozený výkon na konci vedení

$$\mathbf{S}_{2p} = \frac{\mathbf{U}_{2p}^2}{\mathbf{Z}_v} = \frac{(400 \cdot 10^3 \angle 0^\circ \text{V})^2}{241,8605 \angle -3,26^\circ \Omega}$$

$$\mathbf{S}_{2p} = (660,4678 + j37,6197) \text{MVA} = 661,5384 \angle 3,26 \text{MVA}$$

- činný, jalový a zdánlivý výkon na konci vedení při chodu s přirozeným výkonem

$$\begin{array}{lll} P_{2p} = \operatorname{Re}\{\mathbf{S}_{2p}\} & Q_{2p} = \operatorname{Im}\{\mathbf{S}_{2p}\} & S_{2p} = |\mathbf{S}_{2p}| \\ \underline{P_{2p} = 660,4678 \text{MW}} & \underline{Q_{2p} = 37,6197 \text{MVAr}} & \underline{S_{2p} = 661,5384 \text{MVA}} \end{array}$$

- účinník na konci vedení při chodu s přirozeným výkonem

$$\cos \varphi_{2p} = \cos \left(\arctan \left(\frac{Q_{2p}}{P_{2p}} \right) \right) = \cos \left(\arctan \left(\frac{37,6197 \cdot 10^6 \text{VAr}}{660,4678 \cdot 10^6 \text{W}} \right) \right)$$

$$\underline{\underline{\cos \varphi_{2p} = 0,9984}}$$

$$\sin \varphi_{2p} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{2p}} = \sqrt{1 - 0,9984^2} = 0,0565$$

- modul proudu na konci vedení při chodu s přirozeným výkonem

$$I_{2p} = \frac{P_{2p}}{\sqrt{3} \cdot U_{2p} \cdot \cos \varphi_{2p}} = \frac{660,4678 \cdot 10^6 \text{W}}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 10^3 \text{V} \cdot 0,9984} = 954,8309 \text{A}$$

- fázor proudu na konci vedení při chodu s přirozeným výkonem

$$\mathbf{I}_{2p} = I_{2p} \cdot (\cos \varphi_{2p} + j \sin \varphi_{2p}) = 954,8309 \text{A} \cdot (0,9984 + j0,0565)$$

$$\underline{\underline{\mathbf{I}_{2p} = (953,3032 + j53,9479) \text{A} = 954,8309 \angle 3,24^\circ \text{A}}}$$

- činitel šíření, činitel útlumu a činitel fázového natočení

$$\gamma = (63,5684 + j1051,38) \cdot 10^{-6} \text{km}^{-1}$$

$$\alpha = \operatorname{Re}\{\gamma\} = 63,5684 \cdot 10^{-6} \text{km}^{-1} \quad \beta = \operatorname{Im}\{\gamma\} = 1051,38 \cdot 10^{-6} \text{km}^{-1}.$$

Pro další výpočty vynásobíme činitele útlumu α a činitele fázového natočení β délkou vedení l . Hodnota činitele fázového natočení vynásobená délkou vedení vychází v radiánech. Tuto hodnotu musíme převést na stupně, aby jsme ji mohli použít ve výpočtech podle vztahů (6.24) a (6.25).

$$\alpha \cdot l = 63,5684 \cdot 10^{-6} \text{km}^{-1} \cdot 300 \text{km} = 0,0191$$

$$(\beta \cdot l)^{\text{rad}} = 1051,38 \cdot 10^{-6} \text{km}^{-1} \cdot 300 \text{km} = 0,3154 \text{rad}$$

$$(\beta \cdot l)^\circ = \frac{180^\circ \cdot 0,3154 \text{rad}}{\pi \text{rad}} = 18,07^\circ$$

- proud na začátku vedení při chodu s přirozeným výkonem podle rovnice (6.24)

$$\mathbf{I}_{1p} = 954,8309 \angle 3,24^\circ \text{ A} \cdot e^{0,0191} \cdot (\cos(18,07^\circ) + j \sin(18,07^\circ))$$

$$\mathbf{I}_{1p} = (906,7007 + j353,6901) \text{ A} = 973,2435 \angle 21,31^\circ \text{ A}$$

- sdružené napětí na začátku vedení při chodu s přirozeným výkonem

$$\mathbf{U}_{1p} = 400 \cdot 10^3 \angle 0^\circ \text{ V} \cdot e^{0,0191} \cdot (\cos(18,07^\circ) + j \sin(18,07^\circ))$$

$$\mathbf{U}_{1p} = (387604,2976 + j126464,0206) \text{ V} = 407713,4288 \angle 18,07^\circ = 407,7134 \angle 18,07^\circ \text{ kV}$$

- komplexní výkon na začátku vedení při chodu s přirozeným výkonem

$$\mathbf{S}_{1p} = \sqrt{3} \cdot \mathbf{U}_{1p} \cdot \mathbf{I}_{1p}^* = \sqrt{3} \cdot 407713,4288 \angle 18,07^\circ \text{ V} \cdot 973,2435 \angle -21,31^\circ$$

$$\mathbf{S}_{1p} = (686,1869 - j38,8444) \text{ MVA} = 687,2855 \angle -3,24^\circ \text{ MVA}$$

- činný, jalový a zdánlivý výkon na začátku vedení při chodu s přirozeným výkonem

$$P_{1p} = \operatorname{Re}\{\mathbf{S}_{1p}\}$$

$$P_{1p} = 686,1869 \text{ MW}$$

$$Q_{1p} = \operatorname{Im}\{\mathbf{S}_{1p}\}$$

$$Q_{1p} = -38,8444 \text{ MVAr}$$

$$S_{1p} = |\mathbf{S}_{1p}|$$

$$S_{1p} = 687,2855 \text{ MVA}$$

- účinník na začátku vedení při chodu s přirozeným výkonem

$$\cos \varphi_{1p} = \cos \left(\arctan \left(\frac{Q_{1p}}{P_{1p}} \right) \right) = \cos \left(\arctan \left(\frac{-38,8444 \cdot 10^6 \text{ VAr}}{686,1869 \cdot 10^6 \text{ W}} \right) \right)$$

$$\cos \varphi_{1p} = 0,9984$$

- ztráty činného výkonu při přenosu přirozeného výkonu

$$\Delta P_{zp} = P_{1p} - P_{2p} = 686,1869 \cdot 10^6 \text{ W} - 660,4678 \cdot 10^6 \text{ W}$$

$$\Delta P_{zp} = 25,7191 \text{ MW}$$

- účinnost při přenosu přirozeného výkonu

$$\eta = \frac{P_{2p}}{P_{1p}} \cdot 100 = \frac{660,4678 \cdot 10^6 \text{ W}}{686,1869 \cdot 10^6 \text{ W}} \cdot 100 = 96,2519\%$$

12 ZÁVĚR

V práci jsou probrány základní metody řešení ustáleného chodu vedení v napěťových hladinách velmi vysokého a zvláště vysokého napětí. Tyto metody lze začlenit do dvou skupin. Jednou je přesné řešení a druhou přibližné řešení ustáleného chodu vedení. Přesné řešení vychází ze základních rovnic dlouhých vedení, tzv. Telegrafních rovnic. Při výpočtu touto metodou je zapotřebí vyčíslit hyperbolické funkce sinus a cosinus. K jejich dostatečně přesnému vyčíslení je v práci použito součtu prvních pěti členů Taylorova rozvoje těchto funkcí. Hodnoty získané touto metodou jsou považovány za referenční. Přibližné řešení, jež je provedeno náhradou vedení dvojbranou, je výpočtově jednodušší, ale není z daleka tak přesné jako předchozí metoda. K řešení jsou použity čtyři resp. pět dvojbranů, které se v elektroenergetice k těmto účelům nejčastěji používají. Jejich použití je značně omezeno délkou vedení. Používají se proto pouze na vedení do délek cca. 400 km.

Práce se také zabývá zvláštními případy chodu vedení. Jedná se o chod naprázdno, nakrátko a chod s přirozeným výkonem. Výpočtem těchto stavů lze z části nastínit jak se změní např. poměry na začátku vedení při náhlém odlehčení vedení, či při zkratu na vedení apod.

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.

Všechny výše popsané metody, kromě obecné metody a grafických metod, byly aplikovány na zadané vedení s konkrétními parametry a se zadaným odběrem, resp. poměry na konci vedení, u „spotřebitele“. Výsledkem řešení tohoto příkladu jsou hodnoty poměrů na začátku vedení, jak při ustáleném chodu, tak i ve zvpáštňných případech chodu vedení. Na základě těchto výsledků je provedeno zhodnocení použitých metod především z hlediska jejich přesnosti.

12.1 Získané výsledky a jejich zhodnocení

V tabulce (Tab.12-1) jsou přehledně uvedeny vypočtené poměry na začátku zadaného vedení jednotlivými metodami. Tyto hodnoty jsou doplněny relativní chybou jednotlivých metod, přičemž hodnoty přesného řešení jsou považovány za referenční.

Tab.12-1 Přehled hodnot poměrů na začátku zadaného vedení při ustáleném chodu

Metoda řešení	U_1			I_1			S_1		
	$ U_1 $	φ_{U1}	$\delta U_1 $	$ I_1 $	φ_{I1}	$\delta I_1 $	$ S_1 $	φ_{S1}	$\delta S_1 $
	[kV]	[°]	[%]	[A]	[°]	[%]	[MVA]	[°]	[%]
Přesné řešení	424,4032	8,68	-	486,9065	7,92	-	357,9190	0,76	-
π -článek	425,1678	8,8	-0,18	486,0933	7,65	0,17	357,9642	1,14	-0,01
T-článek	423,7841	8,63	0,15	488,0693	8,51	-0,24	358,2505	0,12	-0,09
Γ -článek - vst.	444,4226	8,1	-4,72	467,3736	10,78	4,01	359,7666	-2,67	-0,52
Γ -článek - výst.	405,9800	9,56	4,34	509,4663	6,43	-4,63	358,2454	3,13	-0,09
Steinmetzův článek	424,3469	8,68	0,01	487,0680	8,02	-0,03	357,9903	0,66	-0,02

Pozn.: Ve sloupci tabulek (Tab.12-1) a (Tab. 12-2) „Metoda řešení“ je použito označení „ Γ -článek - vst.“ a „ Γ -článek - výst.“ V prvním případě se jedná o Γ -článek s příčnou

větví na vstupu článku a v druhém případě je takto označen Γ -článek s příčnou větví na výstupu článku.

Z hodnot relativních chyb uvedených v tabulce (Tab.12-1) je zřejmé, že pro řešení takového vedení je nejhodnější volit nahradu vedení Steinmetzovým článkem a π -článkem, případně T-článkem. Naopak naprosto nevhodná pro řešení je náhrada těchto vedení jakýmkoliv Γ -článkem.

Pro doplnění jsou uvedeny v tabulce (Tab.12-2) vypočtené hodnoty účinníku na začátku vedení, účinnosti přenosu a ztrát činného výkonu ΔP_z na daném vedení, jež jsou dány rozdílem činného výkonu na začátku vedení P_1 a činného výkonu na konci vedení P_2 .

Tab.12-2 Hodnoty účinníku na začátku vedení, účinnosti přenosu a ztrát činného výkonu na vedení

Metoda řešení	Účinník		Účinnost přenosu		Ztráty činného výkonu	
	$\cos\varphi_1$	$\delta\cos\varphi_1$	η	$\delta\eta$	ΔP_z	$\delta\Delta P_z$
	[-]	[%]	[%]	[%]	[MW]	[%]
Přesné řešení	0,9999	-	97,7960	-	7,8878	-
π -článek	0,9998	0,01	97,7946	0,00	7,9642	-0,97
T-článek	1	-0,01	97,6972	0,10	8,2505	-4,60
Γ -článek - vst.	0,9989	0,10	97,2853	0,52	9,3747	-18,85
Γ -článek - výst.	0,9985	0,14	97,8446	-0,05	7,7101	2,25
Steinmetzův článek	0,9999	0,00	97,7745	0,02	7,9667	-1,00

Poměry na začátku vedení ve zvláštních případech chodu vedení jsou uvedeny v tabulce (Tab.12-3).

Tab.12-3 Poměry na začátku vedení při zvláštních případech chodu vedení

Případ chodu vedení	\mathbf{U}_1		\mathbf{I}_1		\mathbf{S}_1	
	$ \mathbf{U}_1 $	φ_{U1}	$ \mathbf{I}_1 $	φ_{I1}	$ \mathbf{S}_1 $	φ_{S1}
	[kV]	[°]	[A]	[°]	[MVA]	[°]
Chod naprázdno	380,3444	0,36	296,7656	89,91	195,5020	-89,55
Chod nakrátko	400	0	2872,0941	-82,91	1989,8452	-82,92
Chod s přirozeným výkonem	407,7014	18,07	973,2160	21,31	687,2458	-3,24

Z velikosti napětí na začátku vedení při chodu naprázdno je patrné, že dojde k Ferrantiho jevu. Napětí na začátku vedení je menší než na jeho konci. Při chodu nakrátko, kdy jmenovité napětí je na začátku vedení, dojde k nárůstu proudu a výkonu na začátku vedení až na šesti násobek hodnoty, která je při přenosu zadaného výkonu. Přirozený výkon na konci vedení při jmenovitém napětí je 661,5384 MVA. Tento výkon však nelze považovat za maximální přenositelný výkon. Stejně tak ani účinnost přenosu při přenosu přirozeného výkonu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Blažek V., Skala P.: *Distribuce elektrické energie*. VUT v Brně.
- [2] Blažek V., Paar M.: *Přenosové sítě*. VUT v Brně, Brno 2007.
- [3] Hodinka M., Fecko Š., Němeček F.: *Přenos a rozvod elektrické energie*. SNTL Praha, 1989.
- [4] Mayer D.: *Elektrodynamika v energetice*. BEN – Technická literatura, Praha 2005.
- [5] Reiss L., Malý K., Pavlíček Z., Němeček F.: *Teoretická elektroenergetika I*. ALFA Bratislava, 1977.
- [6] Sedláček J., Valsa J.: *Elektrotechnika II*. VUT v Brně, 2004
- [7] ČEPS, a.s. [on-line]. Dostupné z <http://www.ceps.cz>
- [8] Energetická společnost ČEZ, a.s. [on-line]. Dostupné z <http://www.cez.cz>
- [9] Wikipedie otevřená encyklopedie [on-line]. Dostupné z http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlavní_strana