



ČVUT

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Tadeáš Jandus

Možnosti integrace decentralizovaných zdrojů do distribuční soustavy nízkého napětí

Katedra elektroenergetiky

Vedoucí diplomové práce: Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jandus** Jméno: **Tadeáš** Osobní číslo: **420028**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Možnosti integrace decentralizovaných zdrojů do distribuční soustavy nízkého napětí.

Název diplomové práce anglicky:

Possibilities of integrating decentralized sources into the low voltage distribution network.

Pokyny pro vypracování:

1. Popište strukturu a vývoj centralizovaných a decentralizovaných zdrojů energie v ES ČR.
2. Vysvětlete vliv decentrálních zdrojů na změny provozních poměrů v distribučních sítích NN.
3. Pro modelovou síť NN analyzujte vliv decentrálních zdrojů na provozní parametry distribuční soustavy.
4. Vyhodnoťte možná opatření pro zvýšení připojitelnosti decentrálních zdrojů do sítí NN.

Seznam doporučené literatury:

- 1) MASTNÝ Petr a kol., Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha, ČVUT 2011. ISBN978-80-01-04937-2.
- 2) FEJT, Z., ČERMÁK, J.: Elektroenergetika. Skripta ČVUT, Praha: 1985.
- 3) Pravidla provozování distribučních soustav [online]. Dostupné z:
<http://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds.html>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **07.02.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2020**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Dle Metodického pokynu č. 1/2009 Českého vysokého učení technického v Praze,
ze dne 1. července 2009:

*„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl
veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování
etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“*

V dne

Podpis autora

Rád bych poděkoval panu Ing. Mgr. Vítu Kleinovi, Ph.D., za rady a připomínky k diplomové práci. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu Švecovi, Ph.D., ze společnosti ČEZ Distribuce, a.s., za poskytnutí modelů sítí, cenné rady a praktické informace. Děkuji Bc. Anně Filipové za korekturu textu.

Název práce: Možnosti integrace decentralizovaných zdrojů do distribuční soustavy nízkého napětí

Autor: Bc. Tadeáš Jandus

Katedra: Katedra elektroenergetiky

Vedoucí diplomové práce: Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D., Katedra elektroenergetiky

Abstrakt: Tato diplomová práce se zabývá připojitelností stále více se rozšiřujících decentralizovaných zdrojů elektrické energie do hladiny nízkého napětí. V teoretické části práce je čtenář seznámen s energetickými zdroji, strukturou české elektroenergetiky a s vybranými dokumenty. Dále autor popisuje parametry distribučních soustav nízkého napětí se zaměřením na vliv decentralizovaných zdrojů elektrické energie na napěťové změny a na možnosti řízení napětí. V praktické části autor zkoumá připojitelnost fotovoltaických zdrojů do modelové nadzemní a kabelové sítě nízkého napětí z hlediska napěťových změn.

Klíčová slova: Decentralizace, zdroj elektrické energie, fotovoltaika, nízké napětí, připojitelnost, napěťová nesymetrie, energetika

Title: Possibilities of integrating decentralized sources into the low voltage distribution network

Author: Bc. Tadeáš Jandus

Department: Department of Electroenergetics

Supervisor: Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D., Department of Electroenergetics

Abstract: This thesis deals with the connectivity of nowadays expanding decentralized energy sources to the low voltage level. In the theoretical part, the reader is acquainted with energy sources, the structure of the Czech energy sector and selected documents. Furthermore, the author describes the parameters of low voltage distribution systems with a focus on the influence of decentralized power sources on voltage changes and on the possibilities of voltage control. In the practical part, the author examines the connectivity of photovoltaic sources to model low-voltage overhead and cable lines in terms of voltage changes.

Keywords: Decentralization, power source, photovoltaics, low voltage, connectivity, voltage asymmetry, energy

Obsah

Seznam zkratek	5
Seznam použitých veličin a proměnných	7
1 Úvod	11
2 Centralizované a decentralizované zdroje energie	13
2.1 Centralizované zdroje energie	13
2.2 Decentralizované zdroje energie	14
3 Obnovitelné zdroje energie	17
3.1 Slunce	17
3.1.1 Fotovoltaika	19
3.1.2 Fotovoltaické provozní systémy	21
3.2 Voda	23
3.3 Vítr	25
3.4 Biomasa	27
3.5 Geotermální energie	27
4 Neobnovitelné zdroje	29
4.1 Uhlí	30
4.2 Ropa	32
4.3 Zemní a břidlicový plyn	32
4.4 Uran a plutonium	33
5 Zdroje a spotřeba v ČR	35
5.1 Zastoupení zdrojů	35
6 Smart grids	37
6.1 NAP SG	38
7 Soustavy NN	41
7.1 Topologie	41
7.2 Uzemnění prvků	42
7.3 Typy vedení	43
7.3.1 Nadzemní	44
7.3.2 Kabelové	46
7.4 HDO	48

8	Napěťové a proudové poměry	49
8.1	Symetricky zatížený vývod bez zdroje	49
8.2	Zdroj pracující do soustavy	51
8.3	Regulace jalového výkonu	53
8.3.1	Charakter jalového výkonu	53
8.3.2	Řízení jalového výkonu zdroje napětím — $Q(U)$ regulace .	56
8.3.3	Regulace činného výkonu zdroje napětím — $P(U)$ regulace	59
8.4	Příklad výpočtu	60
8.4.1	Bez připojeného zdroje	60
8.4.2	Účinník zdroje $\cos \varphi_a^z = 1$	61
8.4.3	Účinník zdroje $\cos \varphi_b^z = 0,9$ ind.	62
8.4.4	Shrnutí	62
8.5	Nesymetrie napětí a proudu	63
8.5.1	Metoda souměrných složek	63
8.5.2	Třífázová soustava se středním vodičem	64
9	Pravidla provozu distribučních soustav	67
9.1	Příloha 3 — kvalita napětí	67
9.1.1	Frekvence	68
9.1.2	Rychlé změny napětí	68
9.1.3	Odchyšky napětí	69
9.1.4	Nesymetrie napětí	69
9.1.5	Vyšší harmonická napětí	69
9.2	Příloha 4 — paralelní provoz výroben	70
9.2.1	Mikrozdroje nedávající do soustavy	71
9.2.2	Paralelní provoz se soustavou	71
9.2.3	Flicker	72
9.2.4	Dovolené zvýšení napětí	73
9.2.5	Funkce $P(U)$	74
9.2.6	Funkce $Q(U)$	74
9.3	Projekt InterFlex	76
10	Modelování vlivu zdrojů	79
10.1	Program DNCalc	79
10.1.1	Omezení	79
10.2	Parametry modelů	80
10.2.1	Odběry	80
10.2.2	Zdroje	80
10.3	Hodnocení připojitelnosti	81
10.3.1	Scénáře	82

11 Nadzemní síť	83
11.1 Popis modelu	83
11.2 Výsledky	84
11.2.1 Maximální připojitelné výkony	84
11.2.2 Míry napěťové nesymetrie	85
11.2.3 Napěťový profil vývodu	86
11.2.4 Proudové poměry	87
12 Kabelová síť	89
12.1 Popis modelu	89
12.2 Výsledky	90
12.2.1 Maximální připojitelné výkony	90
12.2.2 Míry napěťové nesymetrie	91
12.2.3 Napěťový profil vývodu	93
12.2.4 Proudové poměry	94
Závěr	95
Seznam použité literatury a zdrojů	99
Příloha Nadzemní síť	109
Příloha Kabelová síť	119

Seznam zkratek

- AC — (ang.) alternating current (střídavý proud)
- AES — samonosný hliníkový venkovní vodič s PVC izolací
- AlFe — hliníkový vodič s železným nosným jádrem
- ang. — angličtina
- atm. — zemská atmosféra
- BRKO — biologicky rozložitelná část komunálního odpadu
- C — (fr.) combiné (kombinovaný)
- CZT — centrální zásobování teplem
- ČR — Česká republika
- ČSN EN — harmonizovaná technická norma
- DC — (ang.) direct current (stejnoseměrný proud)
- DS — distribuční soustava
- DTS — distribuční trafostanice
- DZT — decentralizované zásobování teplem
- ERÚ — Energetický regulační úřad
- ES — elektrizační soustava/ekvivalent soustavy
- FACTS — (ang.) flexible AC transmission system (střídavý přenosový regulační systém)
- fr. — francouzština
- FVE — fotovoltaická elektrárna
- HDO — hromadné dálkové ovládání
- HDS — hlavní domovní skříň
- I — (fr.) isolé (izolovaný)
- IND — induktivní
- KAP — kapacitní
- LDS — lokální distribuční soustava
- LED — (ang.) light emitting diode (světlo emitující dioda)
- LV ABC — (ang.) low voltage aerial bundled cable (niskonapěťový nadzemní svazkový kabel)
- max. Maximální
- MPO ČR — Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky
- N — (fr.) neutré (neutrální)
- nap. — napěťový
- NAP SG — Národní akční plán pro smart grids
- nes. — nesymetrie
- NN — nízké napětí
- NT — nízký tarif
- PE — (ang.) protective earth (ochranný vodič)

PEN — (ang., fr.) protective earth-neutr  (ochrann  a neutrální vodič)

PEZ — prim rn  energetick  zdroj

PPDS — Pravidla provozu distribučních soustav

Př. — p r loha

Přip. — p r pojiteln 

PS — p renosov  soustava

PWR — (ang.) pressurized water reactor (tlakovodní reaktor)

rus. — ruřtina

S — (fr.) separ  (separovan )

Sb. — Sb rka z kon   esk  republiky

sek. — sekundární

STC — (ang.) standard test conditions (standardn  testovací podmínky)

T — (fr.) terr  ( inn  uzemn n )

TRF — transformátor

UVN — ultra vysok  napětí

VA — voltamp rov 

VE — vodní elektrárna

vin. — vinutí

VN — vysok  napětí

VT — vysok  tarif

VTE — v trn  elektrárna

VVER — (rus.) vodo-vodjanoj energetičeskij reaktor (vodo-vodní energetick  reaktor)

VVN — velmi vysok  napětí

ZVN — zvl řt  vysok  napětí

Seznam veličin a proměnných

Veličina	Popis	Hodnota - rozměr
A	Plocha	m^2
a	Rayleighho koeficient absolutně čisté a suché atmosféry	1
\mathbf{a}	Komplexní operátor otočení	1
AM	Index atmosférické masy	1
C	Kapacita	F
C_P	Výkonový součinitel	1
C_{prov}	Provozní kapacita	F
C_{flicker}	Činitel flickeru	1
D	Deformační výkon	VAr
e	Eulerovo číslo	$\sim 2,718$
g	Tíhové zrychlení	$9,81 \text{ ms}^{-2}$
$G_{B0, \text{atm}}$	Sluneční konstanta	$1\,368 \text{ Wm}^{-2}$
$G_{B0, \text{zem}}$	Intenzita záření dopadajícího na zemský povrch	Wm^{-2}
$G_{B, \alpha}$	Intenzita záření na zemský povrch — znečištění atm.	Wm^{-2}
H	Čistý spád	m
I	Elektrický proud	A
\mathbf{I}	Fázor proudu	A
$\mathbf{I}_{A, B, C}$	Fázory fázových proudů	A
i	Index	1
$I_{\tilde{c}}$	Činný proud	A
I_j	Jalový proud	A
\mathbf{I}_N	Fázor proudu středním vodičem	A
\mathbf{I}_{PEN}	Fázor proudu vodičem PEN	A
\mathbf{I}_0	Netočivá složka proudu	A
\mathbf{I}_1	Sousledná složka proudu	A
\mathbf{I}_2	Zpětná složka proudu	A
j	Imaginární jednotka	1
k_{k1nn}	Bezrozměrný součinitel	1
L	Indukčnost	H
l	Délka	m
l_v	Délka vedení	m
n	Index	1
P, p	Činný výkon	W
P_{ie}	Instalovaný výkon elektrický činný	MW

Veličina	Popis	Rozměr
P_{it}	Instalovaný tepelný výkon	MW
P_{lt}	Dlouhodobá míra vjemu flickeru	1
$P_{odběr}, p^o$	Činný výkon odběru	W
$P_{polokoule}$	Sluneční výkon dopadající na zemskou polokouli	TW
$P_{soustava}$	Činný výkon ze soustavy	W
P_{vetu}	Výkon větrné turbíny	W
P_{votu}	Výkon vodní turbíny	W
P_{zdroj}, p^z	Činný výkon zdroje	W
Q, q	Jalový výkon	VAr
Q	Objemový tok	m^3s^{-1}
Q_C	Jalový výkon kapacitoru	VAr
Q_L	Jalový výkon induktoru	VAr
q^o	Jalový výkon odběru	VAr
q^z	Jalový výkon zdroje	VAr
q_{max}^z	Maximální jalový výkon zdroje	VAr
R	Rezistance	Ω
R_{lv}	Měrná délková rezistance	Ω
X_0	Netočivá složka rezistance	Ω
X_1	Sousledná složka rezistance	Ω
S	Zdánlivý výkon	VA
S	Fázor zdánlivého výkonu	VA
S_{Amax}	Maximální zdánlivý výkon	VA
S_C	Fázor zdánlivého výkonu kapacitoru	VA
S_{kv}	Zkratový výkon	VA
S_L	Fázor zdánlivého výkonu induktoru	VA
S_{nE}, S_n^z	Jmenovitý zdánlivý výkon zdroje	VA
THD	Celkové harmonické zkreslení	1
$THDU, 2-40$	Celkové harmonické zkreslení, 2. až 40. harmonická napětí	1
$t_{pokryti}$	Doba pokrytí	h
U	Elektrické napětí	V
U	Fázor napětí	V
u	Poměrné napětí	1
$U_{A, B, C}$	Fázory fázových napětí	V
U_f	Fázové napětí	V
U_f	Fázor fázového napětí	V
U_n	Jmenovité napětí	V
$U_s, U_{soustava}$	Napětí soustavy	V
U_s	Fázor napětí soustavy	V
U_z	Napětí zdroje	V
U_z	Fázor napětí zdroje	V
U_0	Netočivá složka napětí	V

Veličina	Popis	Rozměr
U_1	První harmonická složka napětí	V
\mathbf{U}_1	Sousledná složka napětí	V
\mathbf{U}_2	Zpětná složka napětí	V
v	Rychlost	ms^{-1}
W_e	Roční brutto produkce elektřiny	GWh
$W_{\text{spotřeba}}$	Roční celosvětová spotřeba elektřiny	TW
X	Reaktance	Ω
\mathbf{X}	Fázor reaktance	Ω
X_C	Kapacitance	Ω
X_L	Induktance	Ω
X_{lv}	Měrná délková reaktance	Ωkm^{-1}
X_s	Reaktance soustavy	Ω
\mathbf{X}_0	Netočivá složka reaktance	Ω
\mathbf{X}_1	Sousledná složka reaktance	Ω
Z	Impedance	Ω
\mathbf{Z}	Fázor Impedance	Ω
$\mathbf{Z}_{A, B, C}$	Fázory impedance	Ω
\mathbf{Z}_{lv}	Fázor měrné délkové impedance	Ωkm^{-1}
\mathbf{Z}_{ved}	Fázor impedance vedení (fázové vodiče)	Ω
\mathbf{Z}_0	Fázor impedance středního vodiče	Ω
α	Úhel	$^\circ$; rad
δ	Úhel přenosu	$^\circ$; rad
$\Delta U_{f, \text{ved}}$	Úbytek fázového napětí na vedení	V
$\Delta \mathbf{U}_{f, \text{ved}}$	Fázor úbytku fázového napětí na vedení	V
Δu_{nn}	Poměrný nárůst napětí	1; %
$\Delta u_{nn, \text{max}}$	Maximální poměrný nárůst napětí	1; %
η_t	Účinnost turbíny	%
λ	Opravdový účinník	1
ρ_I	Činitel proudové nesymetrie	1; %
ρ_U	Činitel napěťové nesymetrie	1; %
ρ_{voda}	Hustota vody	kgm^{-3}
ρ_{vzd}	Hustota vzduchu	kgm^{-3}
φ	Fázový posuv	$^\circ$; rad
φ_I	Fáze proudu	$^\circ$; rad
φ_{prov}	Provozní úhel zdroje nebo odběru	$^\circ$; rad
φ_U	Fáze napětí	$^\circ$; rad
ω	Úhlová frekvence	s^{-1}



1. Úvod

Vývoj lidské společnosti je neodmyslitelně spojen se zdroji energie. Podíváme-li se do historie, zjistíme, že lidstvo prošlo třemi energetickými revolucemi. První proběhla v době kamenné, ve které se pračlověk naučil používat oheň, v té době jako zdroj tepla, k vaření a jako ochranu před divokými zvířaty. Později objevil člověk způsoby, jak využít energii větru a vody, a získal tak zdroj mechanické energie. Druhá energetická revoluce nastala počátkem 19. století. Velké nasazení parních strojů vyvolalo požadavky na větší množství dřeva a při hledání alternativ se ujalo uhlí. Význam uhlí, ale i obecně fosilních paliv rostl kvůli jejich velkému množství a také vyšší energetické hustotě na jednotku množství. Uhlí má dodnes v energetice silnou úlohu. Třetí energetická revoluce přišla s objevem štěpné jaderné reakce a jejím využitím v energetice. V současné době rychlého technologického pokroku a rozvoje obnovitelných zdrojů energie někteří odborníci predikují čtvrtou energetickou revoluci týkající se skladování energie¹.

Přihlédneme-li k historickým demografickým údajům lidské populace, zjistíme jednoznačnou korelaci mezi růstem populace a rozvojem využívání energetických zdrojů. Rozvoj lidstva a pokrok jsou založeny na zdrojích energie a celkově vzniká uzavřený kruh: dostatek energie vede k blahobytu a růstu populace, který dále vede k vyšším energetickým požadavkům i přes rozvoj technologií a zvyšování účinnosti zařízení.

Energetické krize, zejména blackoutu, tedy rozsáhlé déletrvající výpadky dodávky energie, ukazují extrémní závislost lidské společnosti na energii. Pozorování těchto událostí prokázalo, že blackout vede k destabilizaci až rozpadu společnosti — k rabování, krádežím a vraždám. Okamžik tohoto zlomu je závislý na stavu společnosti, sociálních poměrech a dalších faktorech. Například při nejznámějším blackoutu v New Yorku v roce 1977 došlo k rozpadu společnosti již během pár hodin. V České republice se předpokládá destabilizace společnosti a následně vyhlášení výjimečného stavu pátý den po vzniku blackoutu².

Základem současného světa jsou fosilní paliva pokrývající kolem 75 % světové spotřeby energie, tedy tepla, elektřiny a pohonných hmot. Fosilní paliva jsou v současné době dostupná v požadovaných množstvích, mají dobrou energetickou hustotu a technologie zařízení zpracovávajících tyto paliva jsou velmi dobře propracovány. Dále energetická zařízení pracující s fosilními a jadernými

¹4. energetická revoluce je skladování elektřiny, říká Drábová. OEnergetice.cz [online]. 2015 [cit. 2018-12-27]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/akumulace-energie/4-energeticka-revoluce-je-skladovani-elektřiny-rika-drabova/>

²Pilotní projekt s automatickým odlehčováním spotřeby realitou (RESPO) [online]. Konference ČEZ Měření Špindlerův Mlýn, 18.4.2012, 2012 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/o-spolecnosti/dcerine-spolecnosti/cez-mereni/konference_2012/City-Plan_Benes_CZ.pptx

palivy poskytují dobrou stabilitu elektrizační soustavy, protože nejsou závislá na přírodních vlivech, tedy jsou schopná kontinuální dodávky energie. V současné době vzniká silný tlak na nasazování obnovitelných zdrojů energie především kvůli jejich menšímu vlivu na životní prostředí. V důsledku snadné dostupnosti a existence různých finančních podpor se tak tyto zdroje ve velké míře stávají předmětem podnikatelských záměrů, ale i koneční odběratelé elektřiny jsou motivováni k instalacím. Masové připojování těchto decentralizovaných zdrojů na straně odběratelů může způsobovat různé problémy, na které energetika založená na konceptu centralizace není připravena.

Slovní spojení „výroba energie“ se nemusí zdát příliš vhodné, neboť všechny typy energie (tepelná, elektrická, mechanická, potenciální gravitační atd.) vznikají v důsledku *přeměn* z jiných forem energie, nikoli výrobou z dílčích částí něčeho. Nicméně v technické praxi se pojem *výroba* běžně používá a tak tomu je i v této práci.

Veškerá uvedená legislativa je platná k období vzniku práce: listopad 2018 až květen 2019, není-li stanoveno jinak.

2. Centralizované a decentralizované zdroje energie

Centralizovanost respektive decentralizovanost energetických zdrojů elektřiny budeme v našich úvahách posuzovat z hlediska celkové energetické koncepce, nikoli z lokálního hlediska, které za centralizovanou výrobu považuje například kogenerační výrobu zásobující městské sídliště. Z našeho pohledu tedy tento příklad hodnotíme jako decentralizovanou výrobu.

2.1 Centralizované zdroje energie

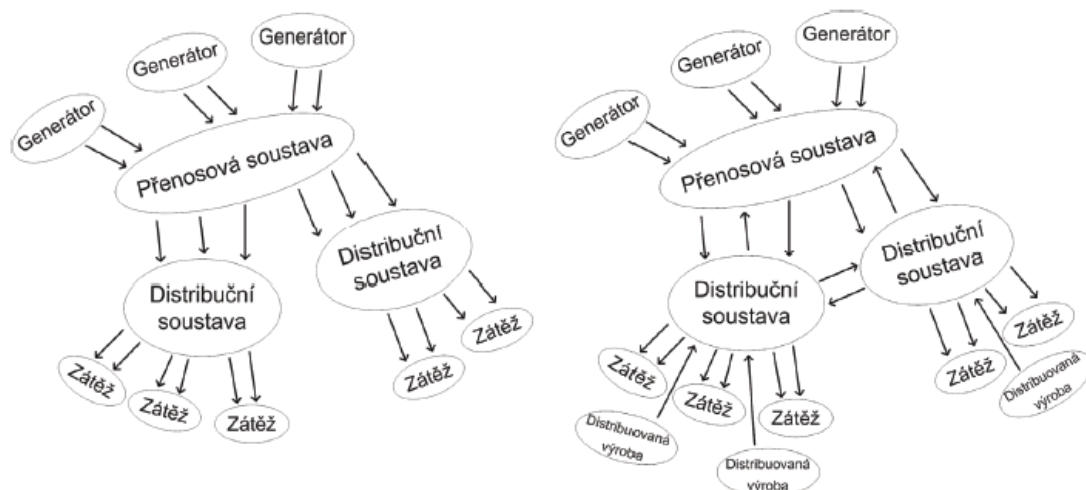
Centralizované zdroje jsou takové zdroje, které zásobují rozlehlou oblast. Zdroje z tohoto hlediska lze rozlišovat i podle napěťové hladiny soustavy, do které pracují. Centralizované zdroje pracují zpravidla do nejvyšších napěťových hladin, protože zásobují velké oblasti a přenosové ztráty klesají s druhou mocninou napětí. Jedná se o přenosové soustavy definované právě jako struktury spojující výrobce a distributory elektřiny, kteří dále zprostředkovávají rozvod ke konečným spotřebitelům. V pojetí klasické energetiky jsou centralizovanými zdroji především uhelné elektrárny stavěné v blízkosti zdrojů primární energie (uhelných dolů) a elektrárny jaderné.

Naše definice nám ale do této kategorie umožňuje zařadit všechny ostatní zdroje jako velké fotovoltaické, vodní, (paro)plynové elektrárny apod. Velkovýroba energie je ekonomicky výhodná, protože průměrné náklady klesají s objemem produkce. Nevýhodami těchto výroben jsou vyšší ztráty při přenosu elektrické energie na velkou vzdálenost v porovnání s výrobou v místě spotřeby či negativní dopad výpadku zdroje na elektrizační soustavu. Pro udržení soustavy v chodu je nutné stále udržovat výkonovou bilanci, při které výroba pokrývá okamžitou spotřebu a ztráty. Vypadlý výkon je tak nutno rychle nahradit, což nemusí být vzhledem k jeho velikosti snadné.

Teplo z těchto výroben může být distribuováno do blízkých měst nebo výrobních podniků, pokud jsou v takové vzdálenosti, že je to ekonomicky výhodné. Jedná se o soustavy centrálního zásobování teplem (CZT). Ztráty při přenosu tepla jsou totiž daleko vyšší než při přenosu elektrické energie. Soustavy zásobování teplem můžeme rozdělit na parní, horkovodní a teplovodní. Parní soustavy dosahují vyšších ztrát než vodní. Důvodem je objemová stlačitelnost páry, která způsobuje velký tlakový spád mezi začátkem a koncem potrubí, což vede k růstu rychlosti páry a zvyšování třecích ztrát.

2.2 Decentralizované zdroje energie

Decentralizované zdroje energie zásobují pouze lokální spotřebu na různých úrovních — určité regiony, města, průmyslové podniky, bytové či rodinné domy apod. V případě výroby elektřiny je tedy charakterizujícím znakem to, že pracují do distribuční soustavy. V případě zdrojů tepla se jedná o výroby umístěné nejčastěji přímo v místě zásobovaného objektu či menšího počtu objektů, tedy zdroje napájející decentralizovanou soustavu zásobování teplem (DZT).



Obrázek 2.1: Výkonové toky elektrické energie centralizované (vlevo) a decentralizované koncepce¹

Výkonově se decentralizované zdroje energie pohybují od stovek watt do desítek megawatt. Pokud je v dané soustavě menší odběr než výroba decentralizovanými zdroji elektrické energie, pak dochází k přetokům výkonu do vyšších napěťových hladin, což klade vyšší nároky na řízení soustavy a udržování výkonové rovnováhy. Přetoky se týkají především větrných či fotovoltaických zdrojů vzhledem k jejich nárazové a do jisté míry nepředvídatelné výrobě. V případě fotovoltaických zdrojů navíc výroba nekoreluje se spotřebou energie.

Na Obrázku 2.1 jsou znázorněny toky výkonu v centralizovaném a decentralizovaném konceptu energetiky.

Historicky první zdroje elektřiny byly decentralizované. Neexistovaly žádné přenosové ani distribuční soustavy. Elektrárny, nejčastěji poháněné vodním kolem či parním strojem, napájely podnikovou technologii a osvětlení. Následně se začala elektřina rozšiřovat do veřejného prostoru, později i do domácností, k napájení osvětlení. Pohonnými jednotkami generátorů se začaly stávat vodní turbíny, později i parní turbíny. Zprvu nebyly sjednoceny napěťové hladiny ani

¹TLUSTÝ, Josef. Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.

typ používaného elektrického proudu (stejnoseměrný, střídavý) a sítě se lišily i na úrovni jednoho města. S technologickým pokrokem začala vznikat různá elektřinou napájená zařízení ulehčující lidem práci, což vedlo k vyšším energetickým požadavkům. Elektřina byla také brána jako prostředek k růstu průmyslu a celkově k rozvoji společnosti.

Na území dnešní České republiky a Slovenské republiky (tehdejší Československo) byla na základě ustanovení v energetickém zákoně č. 438/1919 Sb. z roku 1919 o státní podpoře při zahájení soustavné elektrizace, ve znění pozdějších předpisů, zahájena soustavná a státem řízená elektrizace s unifikovanými postupy, nicméně se nejednalo o centralizovaný koncept. Po znárodnění výrobních a rozvodných podniků v roce 1945 se začala formovat nová energetická koncepce inspirovaná Sovětským svazem směřující k centralizaci.

V dnešní době nabývá na významu decentralizovaný přístup, o kterém se hovoří v souvislosti s jeho menším provozním vlivem na životní prostředí oproti klasickým zdrojům (uhelné) a zvyšováním účinnosti. V případě decentralizovaných zdrojů energie se jedná o všechny obnovitelné zdroje a neobnovitelné zdroje pracující se zemním či břidlicovým plynem. Jedná se z provozního hlediska, s výjimkou zdrojů majících v pracovním cyklu zahrnuto spalování, o bezemisní zdroje, které zapadají do dnešního sociálně-politického trendu. Současná decentralizovaná energetika směřuje k velkému nasazení zdrojů přímo v místě spotřeby, což eliminuje ztráty při transportu energie v souladu s konceptem zvyšování účinnosti.

3. Obnovitelné zdroje energie

Obnovitelné zdroje mají mnoho různých definic. Nejvhodnější definicí je zřejmě definice výčtem: obnovitelným zdrojem nazveme ten zdroj, v němž je uloženo tolik energie, že v dlouhém časovém výhledu nedojde k jeho vyčerpání. Pojem „obnovitelný“ musíme chápat s jistou rezervou. Obnova zdrojů je vždy vázána na jiné energetické zdroje, jinak bychom se dopouštěli fyzikálního nesmyslu. Důkazem nám mohou být například energie větru, vody nebo biomasy, které jsou závislé na sluneční energii.

Zákon č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, definuje obnovitelné zdroje jako nefosilní: *„Obnovitelnými zdroji se rozumí obnovitelné nefosilní přírodní zdroje energie, jimiž jsou energie větru, energie slunečního záření, geotermální energie, energie vody, energie půdy, energie vzduchu, energie biomasy, energie skládkového plynu, energie kalového plynu a energie bioplynu.“*¹

Obnovitelné zdroje v současné době nenabízí tak vysokou energetickou hustotu v porovnání s neobnovitelnými zdroji. S výjimkou geotermálních zdrojů a biomasy z nich nelze kontinuálně získávat energii. Primární energetické zdroje mají totiž stochastický charakter, což je pro energetiku silně nevýhodné. Obrovskou výhodou těchto zdrojů je ale velká dostupnost a možnost výroby v malém měřítku.

3.1 Slunce

V jádru Slunce se slučují jádra vodíku za vzniku hélia a tyto termojaderné reakce dosahují výkonu přibližně $4 \cdot 10^{26} \text{ W}^2$. Střední plošná hustota zářivého toku (intenzita záření) dopadajícího na povrch zemské atmosféry je $G_{B0, \text{atm}} = 1\,367 \text{ Wm}^{-2}$. Tato hodnota byla získána jako průměr z mnohaletých měření a nazývá se sluneční konstanta. Přibližně 1 % dopadajícího záření se od atmosféry odrazí, dalších 20 % dopadajícího záření difunduje na částicích prachu, páry a molekulách plynů a vytváří tak nepřímou složku záření, kterou lze pozorovat z oblohy. Zbylá energie dopadá na zemský povrch přímo, tedy ze slunečního kotouče, a intenzita záření činí pro kolmý dopad ($AM = 1$) a při jasné obloze $G_{B0, \text{zem}} = 1\,000 \text{ Wm}^{-2}$. Dané místo atmosféry může obsahovat vyšší koncentraci prachových částic nebo oblačnost, což modelujeme činitelem znečištění. Pro intenzitu přímého záření do-

¹Zákon o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. In: Sbírka zákonů České republiky. Praha: Ministerstvo vnitra, 2012, ročník 2012, částka 59, číslo 165. Dostupné také z: <https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=z&id=24254>.

²Slunce. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-11-28]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Slunce>

padajícího na zemský povrch platí vztah³:

$$G_{B,\alpha} = G_{B0,atm} \cdot e^{-a \cdot AM \cdot L} \quad [Wm^{-2}; Wm^{-2}; 1; 1; 1], \quad (3.1)$$

kde

- $G_{B0, zem}$ (Wm^{-2}) je sluneční konstanta,
- a (1) Rayleighho koeficient absolutně čisté a suché atmosféry,
- AM (1) je index atmosférické masy,
- L (1) je Linkeho koeficient znečištění atmosféry. Nabývá hodnot od $L = 1$ pro dokonale čistou atmosféru až po $L = 8$ pro nejvíce znečištěné prostředí a smog.

Index atmosférické masy charakterizuje dráhu paprsku procházejícího atmosférou. AM se určí jako $1/\sin \alpha$, kde α (rad) je úhel mezi dopadajícím paprskem a vodorovnou rovinou. Je zřejmé, že čím menší bude úhel α (rad), tím delší bude dráha paprsků v atmosféře a tím více bude docházet k difúzi na shlucích molekul plynů, v páře a v prachových vrstvách.

Budeme-li uvažovat i spotřebu energie pro dopravu, celosvětová roční spotřeba v roce 2018 činila dle odhadů 14 miliard tun ropného ekvivalentu⁴ (toe⁵), což odpovídá $W_{spotřeba} = 1,628 \cdot 10^5$ TWh. Předpokládejme dopadající intenzitu záření $1\,000\, Wm^{-2}$. Pak na zemskou polokouli ze Slunce dopadá výkon $P_{polokoule} = 1,278 \cdot 10^5$ TW. Pokusíme se nyní určit, za jakou dobu dodá Slunce na polokouli výkon potřebný k pokrytí celosvětové roční spotřeby:

$$t_{pokryti} = \frac{W_{spotřeba}}{P_{polokoule}} = \frac{1,628 \cdot 10^5}{1,278 \cdot 10^5} \doteq 1,28 \text{ hodiny.}$$

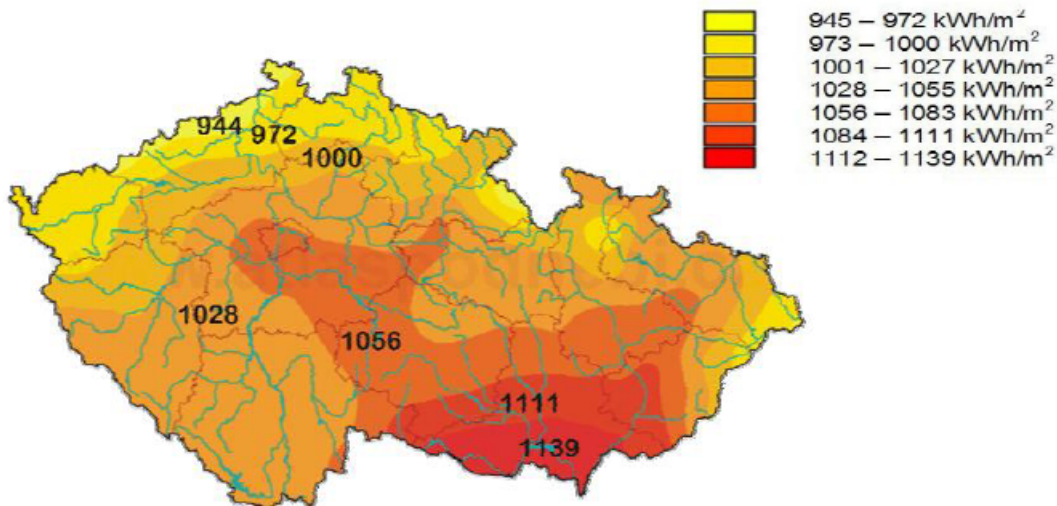
Slunce vyzáří na zemský povrch roční spotřebu energie během jedné hodiny a 17 minut. Jedná se sice o teoretický a velmi hrubý výpočet, nicméně nám dává dobrou představu o Slunci jako bezkonkurenčním zdroji z hlediska dodávky primární energie. Bohužel jsme v současné době značně limitováni možnostmi přeměny této energie (účinností zařízení) na pro nás užitečnější formu, zejména na elektrickou energii.

Na Obrázku 3.1 je znázorněna sluneční mapa České republiky. Jedná se o průměrné hodnoty roční dopadající energie.

³MERTENS, KONRAD. Photovoltaics: Fundamentals, Technology, and Practice. Munich, 2018. ISBN 9781119401049.

⁴Total Energy. Enerdata: Global Energy Statistical Yearbook 2018 [online]. 2019 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>

⁵1 toe (ton of oil equivalent) je odvozená jednotka energie definovaná jako energetický obsah 1 tuny ropy. 1 toe = 11,63 MWh.



Obrázek 3.1: Dopadající sluneční energie na území ČR během roku⁶

3.1.1 Fotovoltaika

V současné době je fotovoltaika nejrychleji se rozšiřujícím obnovitelným zdrojem. V roce 2017 měly celosvětově fotovoltaické elektrárny dvoutřetinový podíl na za tento rok vystavěné výrobní kapacitě obnovitelných zdrojů energie⁷. Obdobný trend se dá očekávat i v budoucnosti.

Fotovoltaické systémy dosahují výkonu od jednotek watt-peak až po jednotky gigawatt-peak. Výkon závisí mimo atmosférických podmínek dané lokality na velikosti zastavěné plochy, neboť systém je modulární a jeho elementární výrobní jednotkou je fotovoltaický panel. Pro potřeby porovnávání fotovoltaických zdrojů bylo v důsledku již zmíněné proměnlivosti atmosférických podmínek nutno stanovit nějaký etalon. Tím se staly standardní testovací podmínky (STC - Standart Test Conditions), které definují špičkový výkon (jednotka wattpeak (Wp)), kterého fotovoltaické panely dosahují při intenzitě ozáření $1\,000\text{ Wm}^{-2}$, teplotě $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a indexu atmosférické masy $AM = 1,5$.

V roce 2018 dosahovaly fotovoltaické elektrárny celosvětově 512 GWp. Instalovaný výkon fotovoltaických elektráren v České republice v roce 2018 dosahoval přibližně 2 GWp.^{8, 9}

⁶Výukové materiály předmětu Aplikace solárních systémů (B1M13ASS), České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.

⁷EU a cíle pro obnovitelné zdroje energie v roce 2020. ENERGETIKA info.cz [online]. 2018 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.energetikainfo.cz/33/eu-a-cile-pro-obnovitelne-zdroje-energie-v-roce-2020-uniqueidgOkE4NvrWuMF1Z1s5yTC1cKryOGddTNm3nOpGic-EvM/>

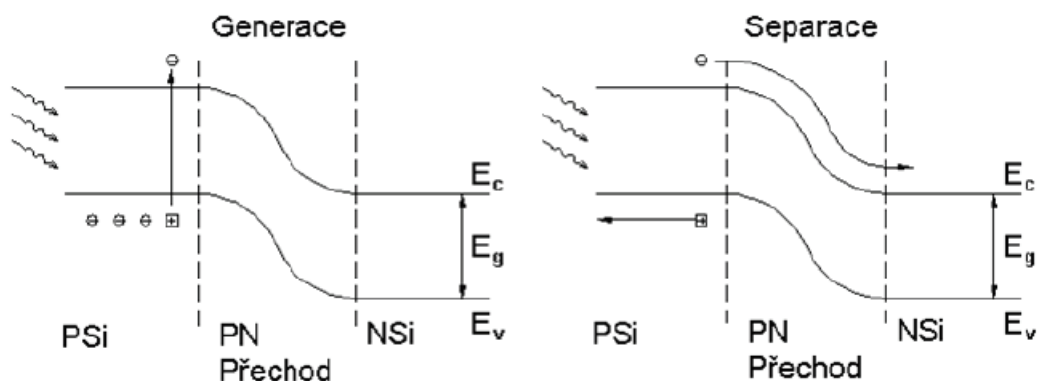
⁸Jaký je vývoj fotovoltaiky v České republice? A jak si stojíme v Evropě?. ESTAV.cz [online]. 2018 [cit. 2019-01-16]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/6385.jaky-je-vyvoj-fotovoltaiky-v-ceske-republice-a-jak-si-stojime-v-evrope>

⁹Growth of photovoltaics. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-01-16]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Growth_of_photovoltaics

Fyzikální princip

Fotovoltaika využívá Slunce jako zdroj primární energie, kterou mění na energii elektrickou. K této přeměně dochází v důsledku interakce fotonů s elektrony vázanými v krystalové mřížce. Tento princip se nazývá vnitřní fotoelektrický jev. Je-li energie dopadajícího fotonu rovna hodnotě výstupní práce materiálu, tedy šíří zakázaného pásu, dojde k přechodu elektronu z valenčního pásu do vodivostního. Pokud je energie záření vyšší než výstupní práce, pak se zbytek energie vynaloží na zvýšení kinetické energie uvolněného elektronu. Záření může dále interagovat s krystalovou mřížkou látky nebo s volnými elektrony. Tato interakce se projeví na zvýšení kinetické energie těchto částic, a tedy teploty materiálu.

Pro křemík činí velikost výstupní práce 1,12 eV¹⁰. Vytvoří se pár elektron-díra, kde dírou chápeme elektronem uvolněné místo ve vazební struktuře látky. Díry se mohou v látce pohybovat a směr jejich pohybu je opačný než směr pohybu elektronů, mají totiž opačný (kladný) náboj. Abychom z materiálu získali elektrickou energii, separujeme elektrony a díry. K separaci nosičů použijeme látkovou strukturu s integrovaným elektrickým polem — polovodičový PN přechod. Proces generace a separace je znázorněn na Obrázku 3.2.



PSi – polovodičový křemík typu P, NSi – polovodičový křemík typu N, E_c – energie vodivostního pásu, E_v – energie valenčního pásu

Obrázek 3.2: Generace a separace nosičů náboje¹¹

Fotovoltaické články a moduly

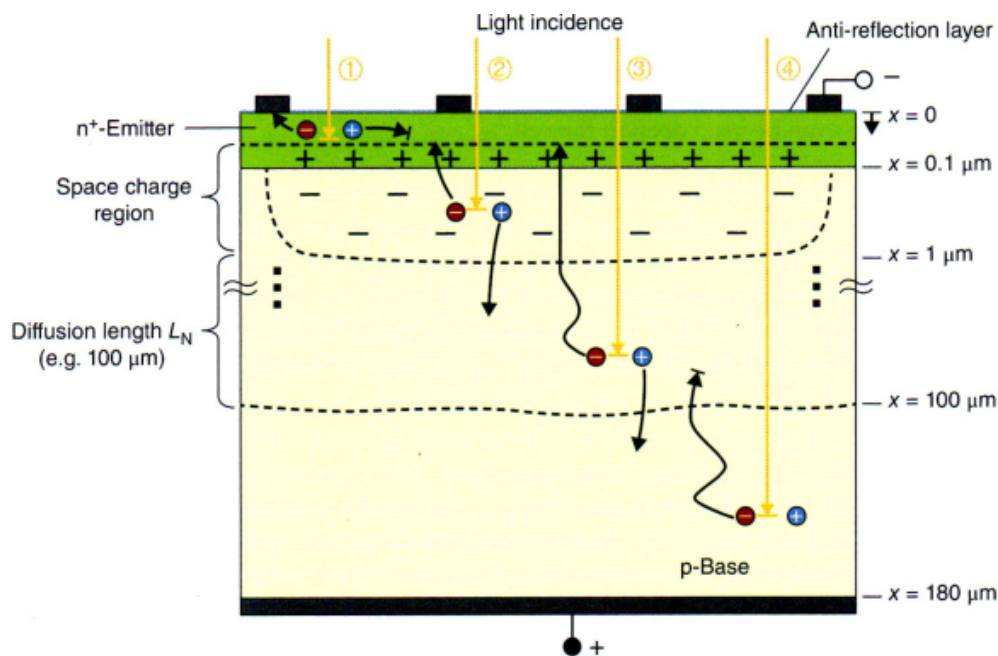
Nejrozšířenější jsou objemové křemíkové články (monokrystalické, multikrystalické), které mají podíl na výrobě 92 %, z tenkovrstvých mají v současné době největší podíl na produkci články CdTe/CdS, a sice 4 %. Další amorfnní materiály jsou například mikrokrytalický či amorfnní křemík. Existují i jiné materiály, zatím experimentální, na bázi nanotechnologií či biologických organismů.

¹⁰eV (elektron volt) je jednotka energie používaná ve fyzice částic. 1 eV definičně odpovídá kinetické energii elektronu urychleného v elektrickém poli o velikosti 1 V. $1 \text{ eV} \doteq 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

¹¹MASTNÝ, Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.

Účinnost monokrystalických článků se pohybuje v rozmezí 15 % až 22 %, multikrystalických v rozmezí 13 % až 18 % a účinnost tenkovrstvých nabývá až 12 %. Teoretickou maximální účinnost fotovoltaických článků udává Shockley–Queisser limit a dosahuje 32 %.^{12,13}

Na Obrázku 3.3 je znázorněn řez krystalickým fotovoltaickým článkem.



Obrázek 3.3: Řez fotovoltaickým článkem¹⁴

Fotovoltaický modul je sérioparalelní zapojení několika fotovoltaických článků. Běžně prodávané fotovoltaické moduly se výkonově pohybují od 30 Wp do 330 Wp. Důležitým parametrem je plošná výkonová hustota, která se pohybuje v rozmezí od 120 Wm^{-2} do 170 Wm^{-2} .¹⁵

3.1.2 Fotovoltaické provozní systémy

Autonomní systémy

Autonomní systémy, nazývané také jako grid-off, pracují odděleně od elektrické sítě a používají se prakticky tam, kde k ní není přístup: v chatách, mobilních objektech jako obytné vozy či lodě, případně zásobují energeticky méně náročná venkovní osvětlení, monitorovací a dopravní zařízení apod.

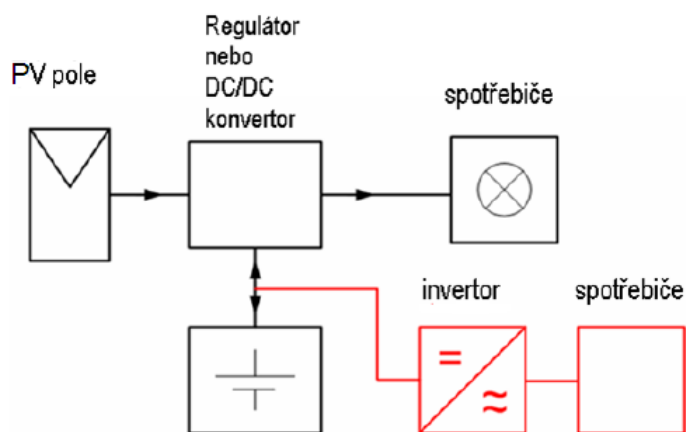
¹²The Shockley Queisser Efficiency Limit. Solarcellcentral [online]. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: http://solarcellcentral.com/limits_page.html

¹³Výukové materiály předmětu Aplikace solárních systémů (B1M13ASS), České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.

¹⁴MERTENS, KONRAD. Photovoltaics: Fundamentals, Technology, and Practice. Munich, 2018. ISBN 9781119401049.

¹⁵Fotovoltaické panely. SVP SOLAR [online]. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z : <https://www.solar-eshop.cz/c/fotovoltaika-1/fotovoltaicke-moduly/>

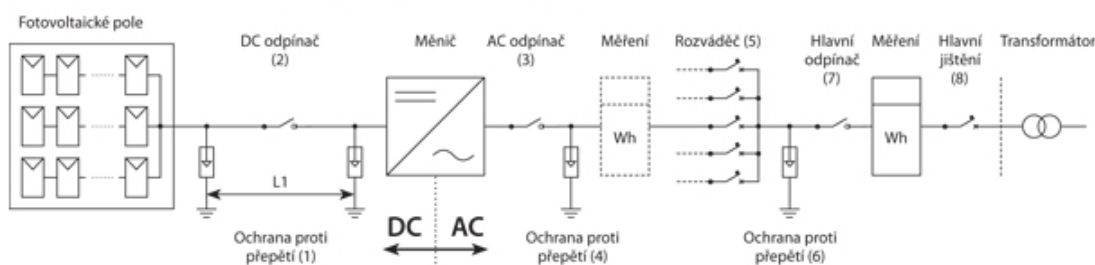
System může být složen pouze z fotovoltaického modulu, který napájí spotřebiče, čímž se funkčnost limituje pouze na dobu osvitu. Praktické aplikace jsou doplněny o akumulátory, regulátory nabíjení a případně stejnosměrné měniče nebo střídače v závislosti na typu napětí (stejnosměrné/střídavé) a napěťové úrovni spotřebičů. Na Obrázku 3.4 můžeme vidět kompletní schéma autonomního systému.



Obrázek 3.4: Autonomní fotovoltaický systém¹⁶

Systemy připojené do elektrické sítě

Tyto systémy, označované jako grid-on, jsou připojené k elektrické síti. Vyroběná energie je na místě spotřebována a přebytky se dodávají do distribuční soustavy. Grid-on systém neposkytuje možnost lokálního uložení energie do akumulátorů. Schéma zapojení je uvedeno na Obrázku 3.5.



Obrázek 3.5: Fotovoltaický systém pracující do sítě¹⁷

¹⁶Výukové materiály předmětu Aplikace solárních systémů (B1M13ASS), České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.

¹⁷OBEČNÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ FOTOVOLTAICKÉHO ZDROJE. OEZ [online]. [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: <http://www.oez.cz/aktuality/obecne-schema-zapojeni-fotovoltaickeho-zdroje>

Hybridní systémy

Hybridní systém kombinuje uspořádání grid-on a grid-off. Systém je připojen k elektrické síti a zároveň obsahuje akumulátory. Dosáhne se tak maximalizace využití vyrobené energie v místě výroby. Tyto systémy mohou obsahovat i řídicí jednotku, která ve spolupráci s měřicími moduly ovládá například napájení ohřevu TUV nebo bazénu. Mimo toto nabízí hybridní systémy také jistou energetickou nezávislost na distribuční soustavě. Díky těmto výhodám jsou hybridní systémy u konečných spotřebitelů na napěťové hladině NN nejrozšířenější, ačkoli jsou dražší než grid-on systémy¹⁸.

3.2 Voda

Oběh vody je podmíněn slunečním zářením, které zaprvé zajišťuje odpar vody z povrchu Země a zadruhé vytváří vítr, který přenáší dešťové mraky. Dále pak gravitací, která vrací vodu zpět na zemský povrch.

Elektrickou energii získáváme z potenciální energie vody a slouží k tomu vodní turbíny měnící tlakovou energii vody na kinetickou energii oběžného kola, které je spojené s elektrickým generátorem. Turbíny běžně nedosahují vysokých otáček, a proto se používají vícepólové synchronní alternátory (hydroalternátory s vyniklými póly). U malých¹⁹ vodních elektráren lze nalézt asynchronní generátory. Vodní turbíny dosahují účinnosti 80 % až 95 % v závislosti na typu a velikosti.

Výkon, který lze z vodní turbíny získat, se určí:

$$P_{\text{votu}} = \rho_{\text{voda}} \cdot H \cdot g \cdot Q \cdot \eta_t \quad (3.2)$$
$$[\text{W}; \text{kgm}^{-3}; \text{m}; \text{ms}^{-2}; \text{m}^3\text{s}^{-1}; 1],$$

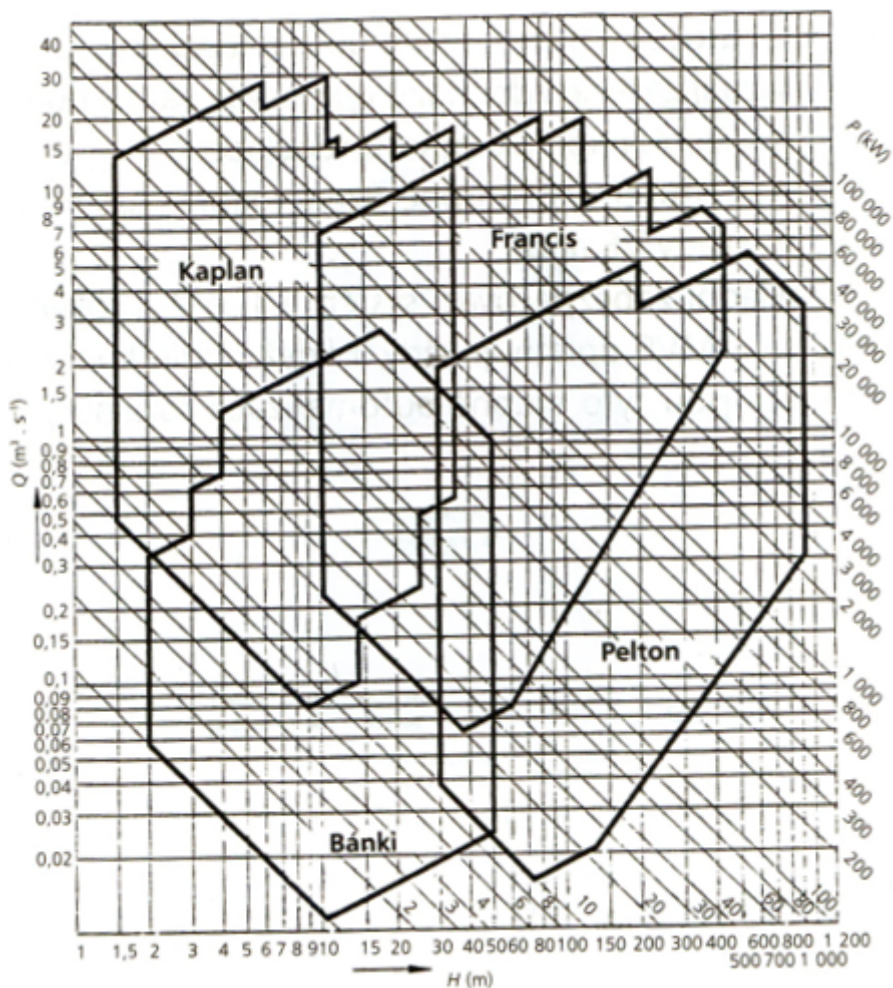
kde

- ρ_{voda} (kgm^{-3}) je hustota vody,
- H (m) je čistý spád získaný odečtením ztrátové výšky (e_{dis}/g) od hrubého spádu (ten nerespektuje disipace energie v přírodním potrubí),
- Q (m^3s^{-1}) je objemový tok vody turbínou,
- η_t (1) je účinnost turbíny.

¹⁸Kdy se vyplatí pořídit si hybridní fotovoltaický systém. Tzb-info.cz [online]. 2017 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/15618-kdy-se-vyplati-poridit-si-hybridni-fotovoltaicky-system>.

¹⁹Dle instalovaného výkonu se běžně elektrárny dělí do výkonových kategorií: drobné do 1 MW, malé do 10 MW, střední do 100 MW a velké nad 100 MW.

Na Obrázku 3.6 jsou znázorněny oblasti nasazení nejrozšířenějších typů vodních turbín. Jak můžeme pozorovat, pracovní oblasti se překrývají. Pokud se v konkrétní aplikaci nalezneme v této oblasti překryvu, volí se po různých úvahách levnější typ turbíny, turbína s vyšší účinností, s lepšími kavitačními nebo provozními vlastnostmi.²⁰



Obrázek 3.6: Oblasti nasazení vodních turbín²⁰

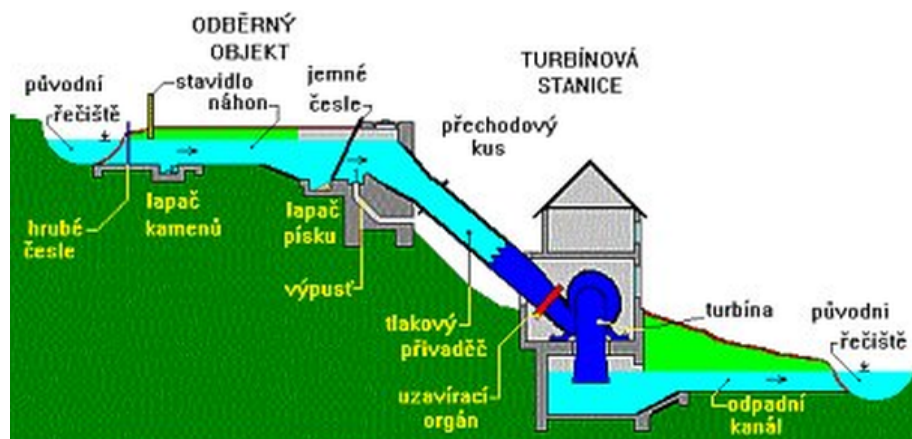
U vodních toků můžeme pozorovat, že nejvyšší koncentrace spádu se nachází v horních částech, kde ale tok dosahuje malého průtoku. Následně podél toku klesá koncentrace spádu a roste průtok díky přítokům. Tok můžeme rozdělit na tři části: horní, střední a dolní. V horní části nalézají uplatnění Peltonovy a případně Francisovy turbíny, ve střední Deriazovy a v dolní Kaplanovy.²⁰

²⁰BLÁHA, Jaroslav a Karel BRADA. Hydraulické stroje. 1. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1992. ISBN 80-03-00665-1.

Podle způsobu úpravy vodního toku můžeme vodní elektrárny rozdělit na:

- Průtočné
 - Derivační
 - Jezové
- Akumulační
 - Přehradní
 - Jezové
 - Přečerpávací
- Přílivové.

Má-li vodní elektrárna nádrž, pak ji nazýváme *akumulační*, v opačném případě se jedná o elektrárnu *průtočnou*. Specifickým typem jsou přílivové elektrárny.



Akumulační vodní elektrárny mimo výroby energie umožňují navíc vodohospodářské využití toku v podobě zásobníku pitné vody nebo k omezování povodní. Z hlediska diagramu zatížení elektrizační soustavy pokrývají pološpičkové a špičkové zatížení. Průtočné vodní elektrárny slouží k pokrytí základního zatížení, akumulační pak pokrývají špičkové zatížení.

Na Obrázku 3.7 je znázorněno schéma derivační vodní elektrárny.

3.3 Vítr

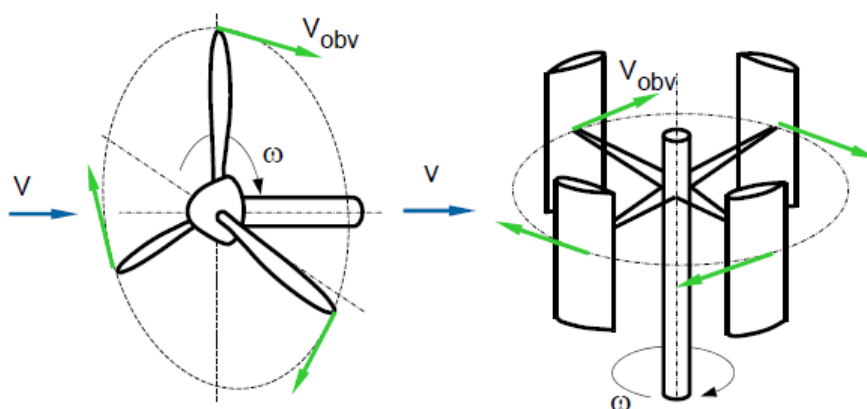
Vítr je proudění vzduchu vyvolané rotací Země a rozdíly tlaku mezi různými místy. Rozdíly tlaku vznikají v důsledku odlišných teplot a hlavní příčinou vzniku

²¹Příroda.cz [online]. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: https://www.priroda.cz/detail_foto.php?id1=100&id2=95

větru je tedy dopadající sluneční záření.

Výkon větrné turbíny (3.3) je závislý v třetí mocnině na rychlosti větru, která je velmi proměnlivá a značně tedy kolísá výkon turbíny. Větrné elektrárny většinou část provozní doby nedosahují jmenovitého výkonu. Používané generátory jsou synchronní i asynchronní, vybavené vhodnými výkonovými polovodičovými prvky, aby mohly pracovat do soustavy.

Na Obrázku 3.8 jsou znázorněny větrné turbíny s horizontální a vertikální osou.



Obrázek 3.8: Horizontální (vlevo) a vertikální větrná turbína²²

$$P_{\text{vetu}} = \frac{C_P}{2} \cdot \rho_{\text{vzd}} \cdot v^3 \cdot A \quad [\text{W}; 1; \text{kgm}^{-3}; \text{ms}^{-1}; \text{m}^2], \quad (3.3)$$

kde

- C_P (1) je výkonový součinitel,
- ρ_{vzd} (kgm^{-3}) je hustota vzduchu,
- v (ms^{-1}) je rychlost proudění vzduchu,
- A (m^2) je plocha vymezená listy turbíny ve směru proudění větru.

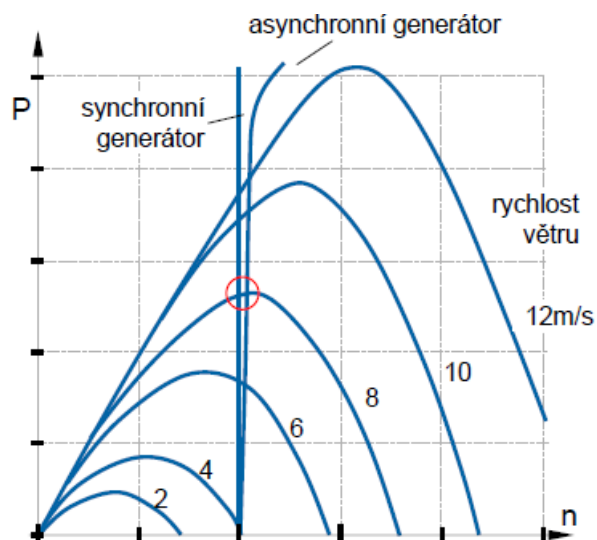
Teoretickým rozbořem větrných turbín lze získat maximální teoreticky dosažitelnou účinnost větrného stroje, která činí $\eta_{\text{vitr,max}} = 59 \%$ a nazývá se Betzova hranice. Reálně dosahují větrné elektrárny maximální účinnosti 48 %. V energetice jsou nejrozšířenější větrné elektrárny s horizontální turbínou.²³

²²KOČÁRNÍK, Petr. Větrné elektrárny: Výukové materiály předmětu Strojní struktury elektráren (B1M14SSE), České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.

²³Větrné elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR. OEnergetice.cz [online]. 2015 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/typy-elektraren/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni/>

Větrné elektrárny mají určitý rozsah pracovní rychlosti větru. Při nízkých rychlostech není generátor schopen dodávat výkon, při vysokých rychlostech větru může dojít k poškození turbíny.

Na Obrázku 3.9 je znázorněn příklad pracovní oblasti větrné elektrárny.



Obrázek 3.9: Pracovní oblast větrné elektrárny²⁴

3.4 Biomasa

Biomasa je obecně souhrn látek tvořících těla rostlin, živočichů, silic a hub, tedy všech živých organismů. V kontextu energetiky se nejčastěji hovoří o rostlinné biomase — dřevní hmotě, případně se z rostlinné hmoty získává v plynových reaktorech pomocí mikrobiálních přeměn bioplyn. Chemickými procesy se z rostlinných hmot extrahují oleje, ze kterých se dalšími procesy vytváří kapalná biopaliva.

Biomasa je nejdéle využívaným zdrojem energie. I když se biomasa využívá spalováním, tak je považována za ekologický zdroj. Spálením biomasy se do prostředí vrátí uhlík, který byl odebrán při růstu rostliny. Produkce SO_2 nebo NO_x (oxidy dusíku) je menší než při spalování uhlí.

3.5 Geotermální energie

Geotermální elektrárny využívají teplo produkované zemským jádrem. Toto teplo v jádře vzniká radioaktivními rozpady a vlivem slapových sil. Ačkoli se geotermální zdroje řadí mezi obnovitelné, ne pro všechny konkrétní zdroje to tak

²⁴KOČÁRNÍK, Petr. Větrné elektrárny: Výukové materiály předmětu Strojní struktury elektráren (B1M14SSE), České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.

podle naší definice platí, protože některé lze vyčerpat v horizontu několika desítek let, neboť dojde k útlumu geotermální aktivity v daném místě. Geotermální energie je nejvíce využívána k vytápění pomocí tepelných čerpadel. Elektrárny pracují na základě parního cyklu, obdobně jako uhelná elektrárna.

4. Neobnovitelné zdroje

Neobnovitelným zdrojem nazveme ten zdroj, ve kterém je uloženo takové množství energie, které se v rámci krátké doby vyčerpá. V kontextu „krátké doby“ se běžně hovoří o časovém horizontu několika stovek let¹. Pokud budeme zkoumat možnosti obnovy těchto zdrojů, lze dodat, že se mohou obnovit, nicméně v rámci velmi dlouhé doby. Lze také jednoduše konstatovat, že se jedná o doplněk energetických zdrojů k obnovitelným.

Podrobný popis neobnovitelných zdrojů není pro tuto práci podstatný, protože se s výjimkou kogeneračních zdrojů pracujících se zemním plynem v paralelním provozu se soustavami NN nevyskytují. Proto si uvedeme jen základní charakteristiky.

Mezi neobnovitelné zdroje se řadí:

- Fosilní paliva
 - Uhlí
 - Ropa
 - Zemní plyn
 - Břidlicový plyn
- Jaderná paliva
 - Uran
 - Plutonium

Energie uložená v chemických vazbách se z fosilních paliv získává spalováním. Ekologický rozdíl mezi spalováním biomasy a fosilních paliv spočívá v tom, že fosilní paliva vznikla z uhlíku, který se nacházel na Zemi před milióny let, a byla po tu dobu uložena pod povrchem. Mezi tou dobou a současností se zemský ekosystém přizpůsobil novému stavu a pokud nyní tato paliva vyjmeme a spálíme, pak narušíme současnou uhlíkovou rovnováhu a zvýšíme jeho koncentraci zejména v podobě CO₂. Oxid uhličitý by pak měl dle některých teorií způsobovat tzv. skleníkový efekt, který vede ke zvyšování průměrné teploty zemské atmosféry. Zde je nutné podotknout, že Země je velmi komplexní celek mající své přirozené teplotní výkyvy, stejně jako Slunce, které určuje zemské klima, a nelze jednoznačně tvrdit, že světová energetika a doprava stojí za prokázaným zvyšováním teploty, neboť korelace produkce skleníkových plynů s rostoucí průměrnou

¹Neobnovitelný zdroj energie. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Neobnoviteln%C3%BD_zdroj_energie

teplotou neznamena jejich kauzalitu. Nelze však ale dokázat ani opak. Zatímco u tohoto globálního problému nelze objektivně prokázat jeho existenci, fosilní zdroje mají ještě negativní lokální vlivy na životní prostředí, byť v současné době značně menší než v minulosti. Jedná se o smog vznikající v důsledku úniku jemných popelovin do atmosféry a dále kyselý dešť způsobené mísením atmosférické vody s oxidy síry, dusíku či oxidem uhličitým.

4.1 Uhlí

Jedná se o zuhelnatělé části rostlin obsahující uhlík, jíl, vodu, sirnaté sloučeniny a křemičitanové horniny². Podle stáří je možné rozdělit uhlí do několika kategorií, přičemž platí, že čím většího stáří uhlí dosahuje, tím má vyšší obsah uhlíku a tedy i výhřevnost. Uhlí začalo vznikat v období přibližně před 360 a 290 milióny let³. V Tabulce 4.1 jsou uvedeny typy uhlí, jejich obsahy uhlíku a výhřevnosti.

Typy uhlí		
Typ	Obsah uhlíku (%)	Výhřevnost (MJkg ⁻¹)
Lignit	30 - 50	10 - 13
Hnědé uhlí	50 - 80	15 - 20
Černé uhlí	80 - 90	18 - 30
Antracit	> 90	24 - 33

Tabulka 4.1: Typy uhlí⁴

Uhelné elektrárny s kondenzační parní turbínou tvoří základní zdroje elektrizačních soustav.

Odběrové turbíny mají mezi vstupní a výstupní částí alespoň jednu přírubu, ze které lze odebírat páru například pro přehřívání napájecí vody, technologické účely či zásobování soustavy CZT.

Emisní pára protitlaké turbíny dosahuje tlaku 0,2 - 0,5 MPa⁵ a lze ji také využít pro jiné účely.

Na Obrázku 4.1 je znázorněno technologické schéma uhelné elektrárny s kotlem v uspořádání: bubnový výparník, prášková spalovací komora a s kondenzační

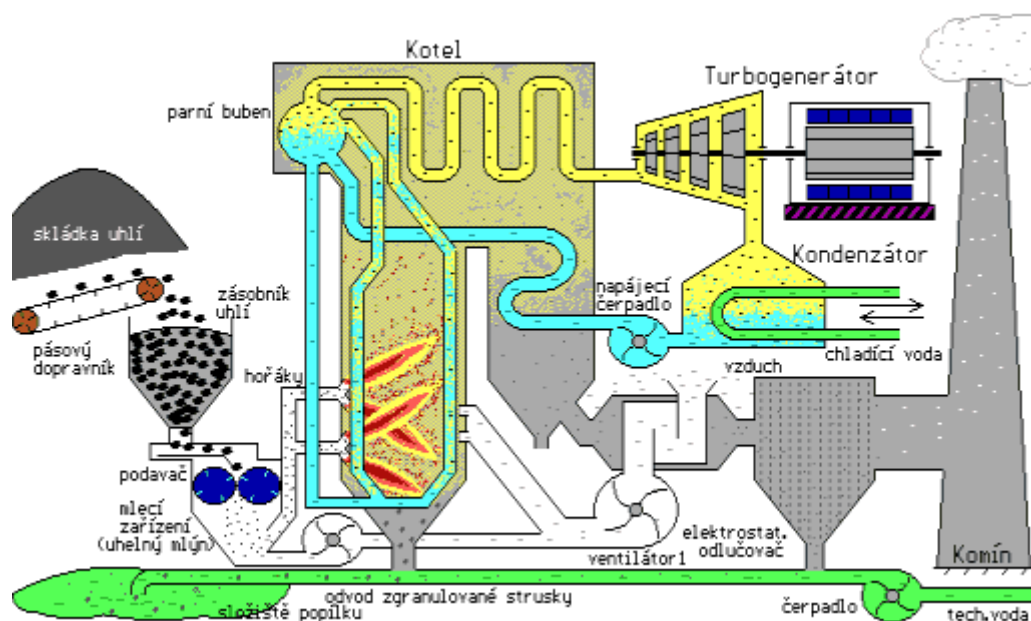
²SLOŽENÍ UHLÍ. OKD [online]. [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.okd.cz/cs/tezime-uhli/uhli-tradicni-zdroj-energie/slozeni-uhli>

³What is coal?. World coal association [online]. [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.worldcoal.org/coal/what-coal>

⁴TYPY UHLÍ. OKD [online]. [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.okd.cz/cs/tezime-uhli/uhli-tradicni-zdroj-energie/typy-uhli>

⁵Výukové materiály předmětu Strojní struktury elektráren (B1M14SSE), České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická

parní turbínou.



Obrázek 4.1: Technologické schéma uhelné elektrárny⁶

Tyto celky mají obrovskou tepelnou setrvačnost a nelze je rychle ve velké míře regulovat, pokud požadujeme bezpečný a ekonomický provoz. Proto pokrývají základní část diagramu zatížení elektrizační soustavy.

Parní turbíny dosahují výkonů od 100 kW do 1000 MW a účinnosti až 95 %. Celková účinnost uhelných elektráren dosahuje až 42 % při použití metod zvyšujících termodynamickou účinnost (přihřívání páry, regenerační ohřev, zvyšování parametrů admisní páry). Účinnost tepláren dosahuje až 80 %.⁷

⁶UHELNÉ PARNÍ ELEKTRÁRNY. Energyweb [online]. [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=2&slovník_page=uhel_el.html

⁷DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7.

4.2 Ropa

Ropa vznikla rozkladem mořských organismů a živočichů. Zásoby ropy se vyskytují často spolu se zemním plynem mezi nepropustnými vrstvami v hloubkách až 10 km pod zemským povrchem. Ropa se také získává pyrolýzou z ropných břidlic. Jedná se především o směs různých kapalných alkanů, obsahuje ale i jiné organické sloučeniny či malé procento síry. Výhřevnost surové ropy se pohybuje v rozmezí 40 MJkg^{-1} až 45 MJkg^{-1} .⁸

Topné oleje získané destilací ropy je možné spalovat ve spalovacích komorách paroplynových elektráren. Dále jsou ropné produkty rozšířeny také jako paliva pro záložní zdroje.

4.3 Zemní a břidlicový plyn

Zemní a břidlicový plyn jsou až z 90 % tvořeny methanem, zbytek jsou delší plynné alkany (ethan, propan, butan)⁹. Tyto plyny je možné spalovat v pístových motorech nebo ve spalovacích komorách, ze kterých jsou horké spaliny vedeny do plynové turbíny. Pístové motory se nacházejí v kogeneračním provozu a dosahují výkonů do 2 megawatt¹⁰. Existují také plynové pístové motory pohánějící záložní generátory. Toto uspořádání bývá napájeno plynem z vlastních zásob plynu daného objektu, protože obecně při výpadku napájení nemusí být napájeny ani regulační stanice a může tak dojít k poklesu tlaku plynu v odběrném místě.

Plynové turbíny dosahují výkonu od 100 kW do 100 MW a účinnosti až 80 %. Účinnost plynových elektráren dosahuje až 40 %¹¹.

Účinnost plynové elektrárny je možné zvýšit využitím horkých, v samostatném plynovém oběhu nevyužitých, spalin vycházejících z plynové turbíny pro generování páry. Vzniká tak paroplynový cyklus a jedná se o kombinaci Ericssonova-Braytonova a Clausiova-Rankinova cyklu. Účinnost tohoto celku činí až 60 %¹². (Paro)plynové elektrárny mají výhodu rychlého startu a možnosti regulace

⁸Ropa. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Ropa>

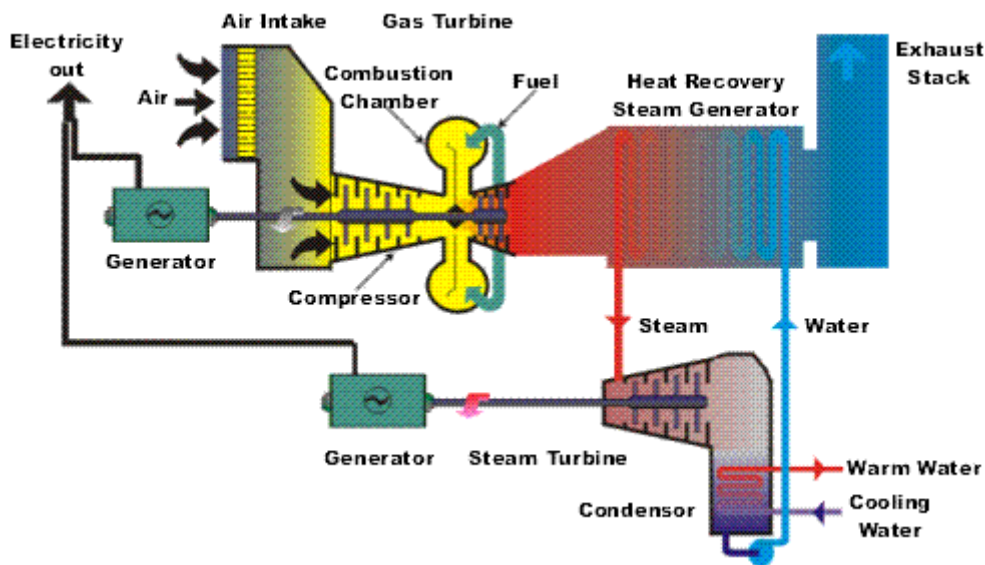
⁹Zemní plyn. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Zemní_plyn

¹⁰DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7.

¹¹DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7.

¹²Informace o paroplynové energetice. Skupina ČEZ [online]. [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/paroplynove-elektrarny/informace-o-paroplynove-energetice.html>

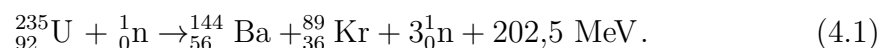
výkonu, proto se používají pro pokrytí špičkového zatížení elektrizační soustavy.



Obrázek 4.2: Schéma paroplynové elektrárny¹³

4.4 Uran a plutonium

Energie se z jaderných paliv získává pomocí štěpení, které se provádí pomocí neutronů. Neutrony jsou pro tuto reakci nejvhodnější, neboť nemají elektrický náboj a nemusí překonávat elektrostatické síly protonů. Štěpná reakce $^{235}_{92}\text{U}$ je popsána rovnicí¹⁴:



Uran se získává z uranové rudy, která je běžně tvořena čistým uranem z 0,04 % až 3 %. Pro štěpnou jadernou reakci je nejvhodnější izotop $^{235}_{92}\text{U}$, kterého se nachází v uranové rudě kolem 0,72 % z celkového obsahu uranových izotopů. Různými metodami se proto zvyšuje jeho koncentrace. Takto upravený materiál s podílem $^{235}_{92}\text{U}$ 3 % až 5 % se nazývá mírně obohacený uran.^{15,16}

Izotop plutonia $^{239}_{94}\text{Pu}$ se vyrábí jadernými reakcemi z izotopu uranu $^{238}_{92}\text{U}$. Štěpení tohoto izotopu plutonia v jaderných reaktorech popisuje rovnice (4.2).

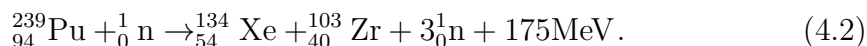
¹³Gas steam powerplant. Quora [online]. [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: <https://qph.fs.quoracdn.net/main-qimg-d3d9995f10c6726c3a92cfeafe587c08>

¹⁴Uran-235. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Uran-235>

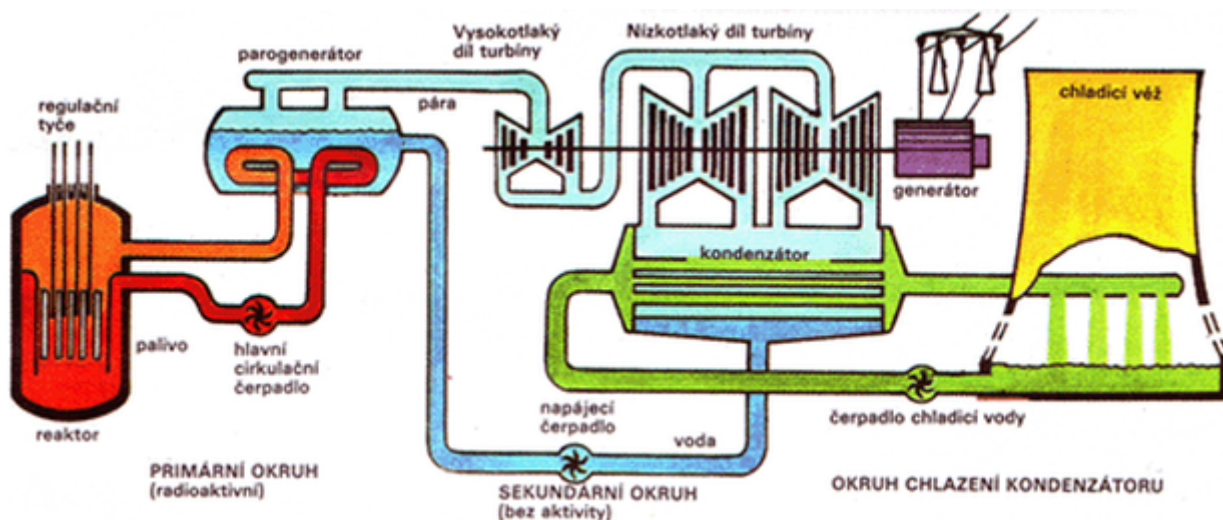
¹⁵Uran (prvek). In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Uran_\(prvek\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Uran_(prvek))

¹⁶DOLEŽAL, Jaroslav. Jaderné a klasické elektrárny. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.

Uvolněná energie při této reakci činí 175 MeV ¹⁷:



Existuje mnoho uspořádání jaderných elektráren z různých hledisek. Nejrozšířenější (kolem 85 %) jsou dvouokruhové jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem (PWR, VVER), ve kterých se pomocí ohřáté vody z reaktoru získává v parogenerátoru sytá pára. Dále je struktura elektrárny principiálně obdobná jako u uhelné elektrárny a liší se pouze zdrojem tepla.



Obrázek 4.3: Technologické schéma jaderné elektrárny¹⁸

Jaderné palivo má vysokou energetickou hustotu, pohybuje se přibližně okolo $3,9 \cdot 10^6 \text{ MJkg}^{-1}$ v závislosti na typu a míře obohacení.¹⁹

¹⁷Plutonium 239. Nuclear Power [online]. [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/plutonium/plutonium-239/>

¹⁸JADERNÁ ELEKTRÁRNA. Techmania Science Center [online]. [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/atomy-castice/jaderna-elektrarna>

¹⁹Palivo - Elektrárny. SVĚT ENERGIE: VZDĚLÁVACÍ PORTÁL ČEZ [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/jaderne-elektrarny/palivo>

5. Zdroje a spotřeba v ČR

5.1 Zastoupení zdrojů

Energetický regulační úřad (ERÚ) vydává čtvrtletní zprávy o provozu elektrizační soustavy České republiky. Zprávu hodnotící celý rok ERÚ vydává v polovině následujícího roku.¹

V době tvorby této práce je aktuální čtvrtletní zpráva ze 4. kvartálu roku 2018, ve které se uvádějí informace i o předchozích kvartálech. Následující údaje jsou za rok 2018, není-li řečeno jinak.

Zastoupení energetických zdrojů v ČR k roku 2018			
Zdroje	P_{ie} (MW _e)	P_{it} (MW _t)	W_e (GWh)
Jaderné	4 290,0	793,0	29 921,3
Parní	11 075,4	29 026,0	45 070,8
Paroplynové	1 363,5	936,3	3 690,0
Plynové a spalovací	909,7	1 036,1	3 687,8
Vodní	1 088,7	0,0	1 627,2
Přečerpávací	1 171,5	0,0	1 050,6
Větrné	316,2	0,0	609,3
Fotovoltaické	2048,9	0,0	2 338,6
Celkem	22 263,9	31 791,7	87 996,4

Tabulka 5.1: Zastoupení energetických zdrojů v ČR k roku 2018²

Kde

- P_{ie} je instalovaný elektrický výkon zdrojů,
- P_{it} je instalovaný tepelný výkon zdrojů (dodávky tepla),
- W_e je roční brutto³ produkce elektřiny za rok 2018.

¹Zprávy o provozu elektrizační soustavy. Energetický regulační úřad [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/zpravy-o-provozu-elektrizacni-soustavy>

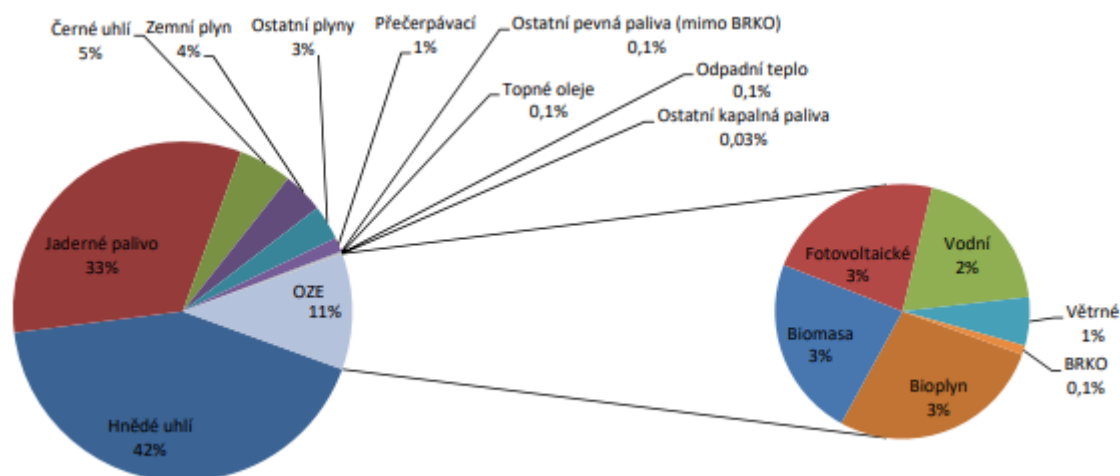
²Čtvrtletní zpráva o provozu ES ČR: IV. čtvrtletí 2018 [online]. Praha: Oddělení statistiky a sledování kvality ERÚ, 2018 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Ctvrtletni_zprava_2018_IV_Q.pdf/f47bc2a0-05e3-4402-a1db-5b6e2b0a44a4

³Nejsou odečteny vlastní spotřeby zdrojů.

Údaje o zastoupení paliv nejsou v poslední čtvrtletní zprávě z roku 2018 uvedeny, proto je převezmeme z Roční zprávy o provozu ES ČR k roku 2017⁴, viz Obrázek 5.1. Z této zprávy si pro porovnání uvedeme ještě celkovou výrobu, která činila v roce 2017 hodnotu 87 038,0 GWh. Z toho vyplývá nárůst o 1,10 % v roce 2018 oproti roku 2017.

Export do zahraničních přenosových soustav v roce 2017 činil 13 242,9 GWh, což odpovídá 16,35 % netto⁵ produkce tuzemských zdrojů elektrické energie v roce 2017 (81 005,0 GWh). Česká Republika je tedy exportérem elektrické energie.

Nejrozšířenějšími palivy jsou uhlí (47 %) a jaderná paliva (33 %). Obnovitelné zdroje energie mají podíl 11 % na energetickém mixu, z čehož zaujímá většina s výjimkou větrných zdrojů a biologicky rozložitelné části komunálního odpadu (BRKO) víceméně stejný podíl.



Obrázek 5.1: Zastoupení paliv v ČR platné k roku 2017⁴

⁴Roční zpráva o provozu ES ČR: 2017 [online]. Praha: Oddělení statistiky a sledování kvality ERÚ, 2018 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2017.pdf/521bff99-fdcf-4c86-8922-3a346af0bb88

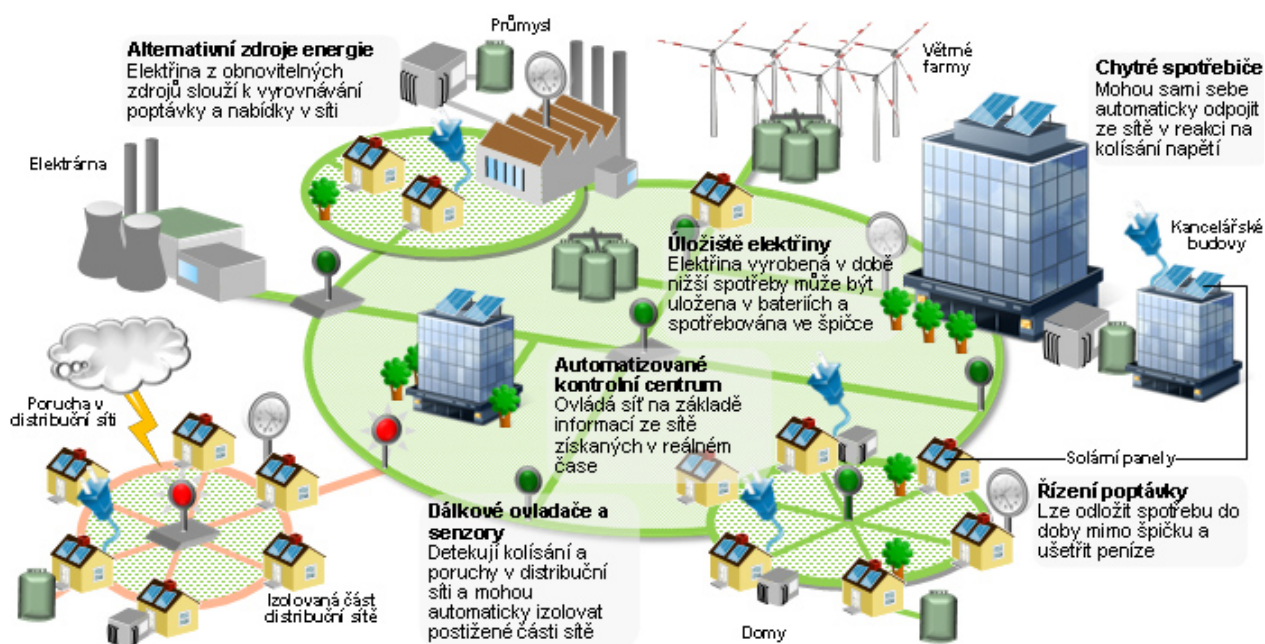
⁵Jsou odečteny vlastní spotřeby zdrojů.

6. Smart grids

Smart grid („inteligentní síť“) je koncept, který si klade za cíl plnou automatizaci a integraci zákazníků a dále přizpůsobení sítě výrobě i na nejnižších napěťových hladinách. Spočívá v řízení výroby, přenosu, distribuce a spotřeby, a to se snahou maximalizovat provozní bezpečnost a efektivitu. Základem jsou monitorovací, komunikační a řídicí prvky, které propojují výrobce energie, provozovatele přenosových a distribučních soustav s odběrateli.

V ideálním případě pak dochází ke zcela automatickému řízení sítě. Význam smart grids v dnešní době roste v důsledku zvyšujícího se počtu decentralizovaných zdrojů připojovaných do distribučních soustav a také rozšiřování elektromobility, což jsou velké nepredikovatelné dodávky a odběry.^{1, 2}

Z hlediska odběratelů zapadá do současného trendu „smart“ technologií, které se již běžně vyskytují v elektroinstalacích odběratelů. Na Obrázku 6.1 je znázorněno principiální schéma smart grid.



Obrázek 6.1: Schéma smart grid³

Společnost ČEZ Distribuce, a.s., v současné době provozuje testovací projekt smart grid v regionu Vrchlabí. Region je v provozu od roku 2010 a dle Národního

¹Víte, co to je a jak funguje smart grid?. Proelektrotechniky.cz [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/22.php>

²Smart grids. Siemens Česká republika [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.siemens.cz/smartcities/smart-grids>

³THE FUTUR/E/MOTION INITIATIVE. SMART GRIDS [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/micrositesutf/odpovednost2011/en/environment/initiativa-future-motion.html>

akčního plánu pro smart grids bude probíhat v roce 2019 vyhodnocení získaných poznatků.^{4, 5}

6.1 NAP SG

Aktualizace Státní energetické koncepce České republiky formulovala nutnost vytvoření dokumentu o implementaci smart grids do elektrizační soustavy. Tímto úkolem bylo pověřeno Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, které počátkem roku 2015 publikovalo Národní akční plán pro chytré sítě (NAP SG). Tento dokument se zabývá požadavky na rozvoj systémů a nástrojů řízení elektrizační soustavy a decentralizovaných zdrojů, a to v letech 2015 až 2020 s výhledem do roku 2040.⁶

Zaměříme se pouze na část týkající se decentralizované výroby. NAP SG stanovuje dva scénáře — nízký a referenční. Oba scénáře počítají s největším nasazením zdrojů na hladině NN. Metodika výpočtů ani předpoklady, ze kterých se stanovují odhady, nebyly zveřejněny. Jedná se o predikci vzdálené budoucnosti a výsledky závisí na velkém množství obtížně predikovatelných faktorů. Čtenář si ovšem může položit otázku, do jaké míry jsou tyto predikce reálné nebo naopak příliš optimistické.

V Tabulce 6.1 jsou uvedeny předpokládané vývoje nasazení obnovitelných zdrojů na hladinách NN a VN. V Tabulce 6.2 jsou pak uvedeny předpokládané náklady na potřebné úpravy sítí VVN, VN a NN.

NAP SG doporučuje provést úplnou úpravu sítí NN a částečnou úpravu sítí VN. Způsoby řízení napětí doporučuje v plné míře realizovat na hladinách VN a VVN, částečně na NN. Akumulaci energie nedoporučuje provádět na žádné napěťové hladině.

⁴Národní akční plán pro chytré sítě (NAP SG) [online]. III. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2015 [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/52353/60358/633373/priloha003.pdf>

⁵Projekt Smart Region ve Vrchlabí. ČEZ Distribuce, a.s. [online]. [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/pro-media/smart-region.html>

⁶Národní akční plán pro chytré sítě (NAP SG). Ministerstvo průmyslu a obchodu [online]. 2015 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/dokument156514.html>

	Skupina zdrojů	2013	2015	2020	2030	2040
Nizký scénář	Biomasa celkem	331 MW	376 MW	433 MW	545 MW	657 MW
	- z toho vn, nn	64 MW	76 MW	88 MW	112 MW	136 MW
	Bioplyn a skládkový plyn celkem	392 MW	434 MW	464 MW	474 MW	484 MW
	- z toho vn, nn	359 MW	401 MW	429 MW	438 MW	447 MW
	BRKO celkem	30 MW	31 MW	56 MW	200 MW	200 MW
	- z toho vn, nn	16 MW	16 MW	25 MW	50 MW	50 MW
	FVE celkem	2 132 MW	2 276 MW	2 302 MW	2 403 MW	2 505 MW
	- z toho vn, nn	1 866 MW	2 010 MW	2 036 MW	2 137 MW	2 239 MW
	VTE celkem	270 MW	324 MW	488 MW	618 MW	748 MW
	- z toho vn, nn	192 MW	235 MW	275 MW	355 MW	445 MW
	Mikrokogenerace celkem	4 MW	61 MW	121 MW	243 MW	364 MW
	- z toho vn, nn	4 MW	61 MW	121 MW	243 MW	364 MW
	VE celkem (bez PVE)	1 083 MW	1 089 MW	1 097 MW	1 098 MW	1 100 MW
	- z toho MVE do vn, nn	356 MW	361 MW	369 MW	370 MW	372 MW
Geotermální celkem	0 MW	0 MW	4 MW	8 MW	16 MW	
- z toho vn, nn	0 MW	0 MW	4 MW	8 MW	16 MW	
Nizký scénář - Celkem (bez biomasy a BRKO)	3 881 MW	4 184 MW	4 476 MW	4 844 MW	5 217 MW	
Nizký scénář - vn, nn (bez biomasy a BRKO)	2 777 MW	3 068 MW	3 234 MW	3 551 MW	3 883 MW	
Referenční scénář	Biomasa celkem	331 MW	376 MW	466 MW	649 MW	930 MW
	- z toho vn, nn	64 MW	76 MW	112 MW	172 MW	232 MW
	Bioplyn a skládkový plyn celkem	392 MW	464 MW	534 MW	574 MW	604 MW
	- z toho vn, nn	359 MW	430 MW	499 MW	538 MW	567 MW
	BRKO celkem	30 MW	31 MW	56 MW	200 MW	200 MW
	- z toho vn, nn	16 MW	16 MW	25 MW	50 MW	50 MW
	FVE celkem	2 132 MW	2 276 MW	2 404 MW	3 567 MW	5 884 MW
	- z toho vn, nn	1 866 MW	2 010 MW	2 138 MW	3 301 MW	5 618 MW
	VTE celkem	270 MW	324 MW	507 MW	799 MW	1 146 MW
	- z toho vn, nn	192 MW	235 MW	305 MW	449 MW	639 MW
	Mikrokogenerace celkem	4 MW	61 MW	303 MW	607 MW	910 MW
	- z toho vn, nn	4 MW	61 MW	303 MW	607 MW	910 MW
	VE celkem (bez PVE)	1 083 MW	1 089 MW	1 097 MW	1 098 MW	1 100 MW
	- z toho MVE do vn, nn	356 MW	361 MW	369 MW	370 MW	372 MW
Geotermální celkem	0 MW	0 MW	4 MW	12 MW	23 MW	
- z toho vn, nn	0 MW	0 MW	4 MW	12 MW	23 MW	
Referenční scénář - Celkem (bez biomasy a BRKO)	3 881 MW	4 214 MW	4 849 MW	6 656 MW	9 667 MW	
Referenční scénář - vn, nn (bez biomasy a BRKO)	2 777 MW	3 097 MW	3 618 MW	5 276 MW	8 129 MW	

Tabulka 6.1: Predikce vývoje instalovaného výkonu⁶

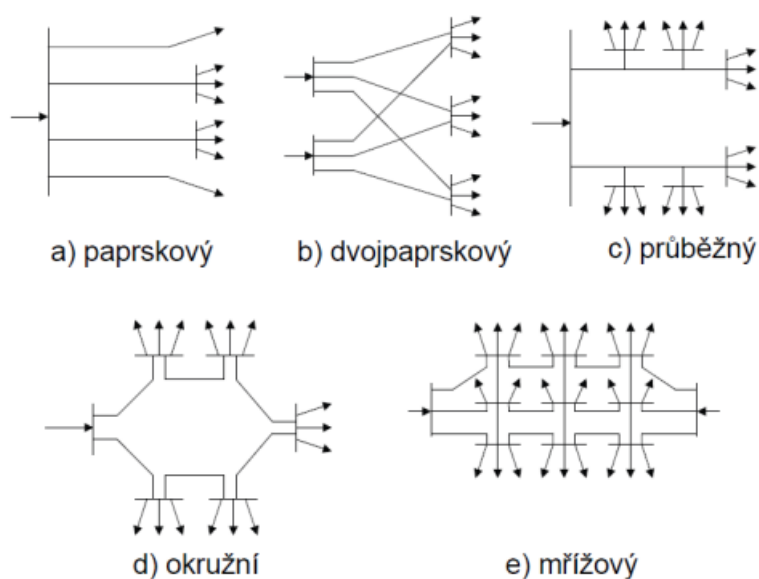
Scénář rozvoje DECE	Napětová hladina	2015 - 2019	2020 - 2024	Celkem 2015-2025	2025 - 2029	2030 - 2040	Celkem 2015 - 2040
		[mil. Kč]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[mil. Kč]	[mil. Kč]
Nizký scénář	nn	0	0	0	226	1 323	1 549
	vn	74	63	137	117	368	622
	vvn	0	0	0	0	0	0
	CELKEM DS	74	63	137	343	1 691	2 171
Referenční scénář	nn	356	16 235	16 591	28 009	48 813	93 413
	vn	349	2 521	2 870	2 435	1 974	7 280
	vvn	0	0	0	0	8 284	8 284
	CELKEM DS	705	18 756	19 461	30 444	59 071	108 977

Tabulka 6.2: Předpokládané náklady na úpravy sítí VN a NN⁶

7. Soustavy NN

7.1 Topologie

Topologie elektrizační sítě může být *otevřená* a *uzavřená*. Otevřený rozvod zajišťuje napájení z jedné strany, zatímco uzavřený z více stran. Volba uspořádání je závislá na požadavcích na provozní bezpečnost, hospodárnost a ekonomickou výhodnost instalace. Napájení z jedné strany má podobu paprskového nebo průběžného rozvodu. Uzavřený rozvod zvyšuje provozní spolehlivost a vyskytuje se v okružní, dvojpaprskové nebo mřížové podobě.¹



Obrázek 7.1: Topologie sítí¹

Topologie distribuční soustavy nízkého napětí je závislá na velikosti napájené oblasti. Používá se paprskový, průběžný či okružní rozvod. Menší obce jsou řešeny paprskovým zapojením, velká města jsou provozována v okružním zapojení. Okruh se často provozuje rozepnutý — rozpadlý na dvě části a při poruše je možné ho přepnout na napájení z druhé strany.¹

Provoz mřížových sítí je poněkud komplikovaný a jejich zřízení je nákladné. V současné době se v ČR provozují pouze dvě mřížové sítě NN: v Brně (E.ON Distribuce, a.s.) a v Šumperku (ČEZ Distribuce, a.s.).

Transformátory VN/0,4 kV jsou výkonově omezeny na 1 250 kVA. Důvodem je velikost zkratového proudu při poruše u odběratelů, která by při vyšších výkonech transformátorů vyžadovala příliš velké nároky na elektrické a mechanické vlast-

¹TOMAN, Petr. Provoz distribučních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.

nosti rozvaděčů, vodičů a přístrojů. Disponují pěti odbočkami s krokem 2,5 %, případně 5 %, např.: $22 \pm 2 \times 2,5 \% / 0,4 \text{ kV}$.²

Přepínání odboček nelze provádět při zatížení. Zvýšené nároky na přepínač by se projeví na ceně a vzhledem k množství těchto transformátorů, velikosti napájené oblasti a frekvenci přepínání (přepíná se zřídka, zpravidla v letním a zimním období kvůli vyššímu zatížení během zimy) je toto uspořádání ekonomicky výhodnější.

7.2 Uzemnění prvků

Dle způsobu uzemnění prvku v sítích rozeznáváme: účinně uzemněné (T), neúčinně uzemněné (N), izolované (I). Způsob uzemnění uzlu transformátoru obecně ovlivňuje velikosti poruchových proudů a velikosti zbylých fázových napětí při vodivém spojení jedné fáze se zemí.

Zavedeme-li obecné proměnné A, B, D , pak lze značení elektrických sítí z hlediska uzemnění zapsat symbolicky:

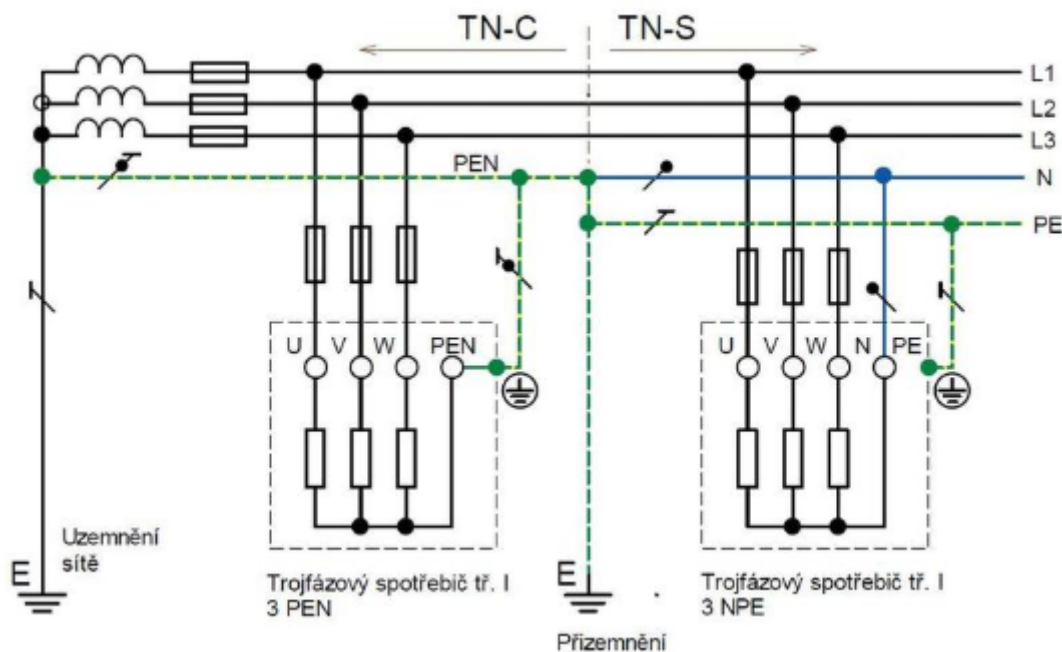
$$AB - D, \quad (7.1)$$

kde

- A (T, N, I) popisuje způsob uzemnění uzlu transformátoru,
- B (T, N) popisuje způsob uzemnění neživých částí (např. podpěrných bodů či přístrojů),
- D (C, S) popisuje uspořádání ochranného a středního vodiče v sítích NN. Písmeno C použijeme pro jejich kombinaci v jednom vodiči (PEN), písmeno S pak pro dva oddělené vodiče (střední N a ochranný PE).

Na Obrázku 7.2 je znázorněno uspořádání sítí TN-C-S z hlediska pracovních a ochranného vodiče.

²TOMAN, Petr. Provoz distribučních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.



Obrázek 7.2: Síť TN-C-S³

7.3 Typy vedení

V sítích NN se vyskytuje uspořádání TN-C-S, kde distributor používá rozvod TN-C z ekonomických důvodů a v hlavním rozvaděči na straně odběratele dojde k rozdělení vodiče PEN na PE a N. Výhody sítě TN-S, respektive TN-C-S v porovnání s TN-C jsou: vyšší bezpečnost, možnost použití doplňkových ochranných v podobě proudových chráničů či nižší elektromagnetické rušení.

Síť NN na straně distributora je tedy řešena jako čtyřvodičová (TN-C). Značení vedení má formu:

$$TYP\ 3 \times PRŮŘEZ_FÁZE + PRŮŘEZ_PEN$$

nebo

$$TYP\ 4 \times PRŮŘEZ_VODIČE,$$

například AlFe6 3×70+50 či 1-AES 4×120. Vodič PEN má často o jeden stupeň normalizovaných průřezů menší průřez než fázové vodiče. Průřez se udává v mm².

Volbu průřezu určuje maximální dovolená teplota vodičů závislá na zatížení, způsobu uložení a okolních podmínkách. Velikost průřezu je také ovlivněna sna-

³Sítě TN. ELUC [online]. [cit. 2019-0-3-12]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/391>

hou snížit úbytky napětí a ztráty přenosu na vedení. Dalším faktorem je to, že případná výměna za vedení s vyšším průřezem kvůli rozšiřování sítě a zvyšování zatížení je značně nákladnější než přímé použití silnějších vodičů.

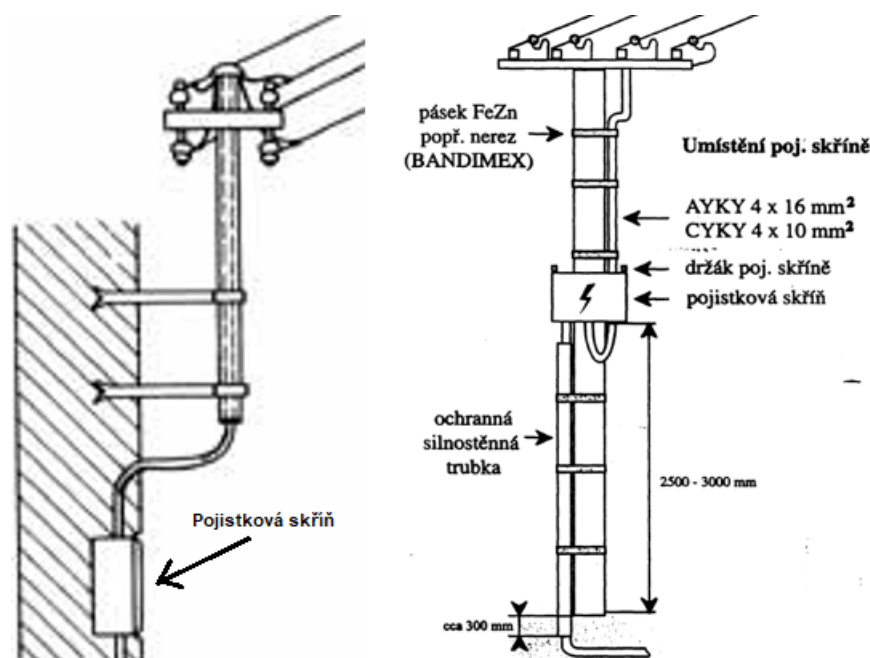
Na hladině NN se dříve používal způsob realizace vývodů z distribuční trafostanice takový, že s rostoucí vzdáleností od zdroje klesal průřez vodičů. Toto uspořádání má smysl, nicméně vzhledem k možnému rozšiřování obecních sítí a v té době nepředvídatelnému nasazování decentralizovaných zdrojů je problematické.

7.3.1 Nadzemní

AlFe lana

Jedná se o vodiče složené z hliníkových (elektrovodných) a ocelových (nosných) lanek. Za elektricky vodivou se považuje pouze hliníková část a udávané průřezy se týkají pouze této části. Podpěrnými body vedení jsou konzole na zdech domů nebo sloupy (betonové či dřevěné). Tato vedení se vyskytují v menších obcích a v současné době nejsou (a zřejmě už nikdy nebudou) budována nová. Při rekonstrukcích sítí se nahrazují podzemními kabelovými vedeními, případně nadzemními izolovanými.

Na Obrázku 7.3 je znázorněno připojení odběratele k nadzemnímu vedení na podpěrných bodech umístěných na zdi domu a na sloupu.



Obrázek 7.3: Možnosti připojení odběratele k nadzemnímu vedení⁴

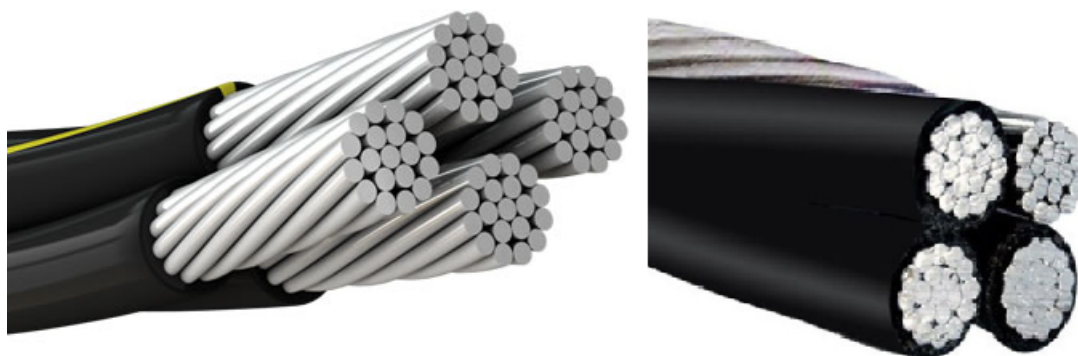
⁴BERNKOPF, Jaroslav. Venkovní a kabelová vedení [online]. s. 24 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: http://www.bernkopf.cz/skola/predmety/silnoproud/materialy/prezentace/vedeni_venkovni_a_kabelova.pptx

AlFe vodiče lze rozdělit do kategorií podle poměru počtu hliníkových lanek k počtu ocelových. Nejpoužívanějšími jsou AlFe6 (poměr 6:1). V soustavách vyšších napětí v oblastech s častým výskytem námrazy se používají AlFe3 (poměr 3:1), které mají vyšší pevnost. Samotná lana se označují formou *PRŮŘEZ_TYP*, např. 95AlFe6.⁵

Nadzemní vedení sítí NN má velmi malou reaktanci v porovnání s rezistancí, poměr je přibližně 1:10⁶. Kapacita vedení je značně menší než indukčnost.

LV ABC

LV ABC (Low Voltage Aerials Bundled Cables) jsou hliníkové vodiče s izolací z polymerového materiálu, nejčastěji polyethylenu odolného vůči UV záření. Vodič PEN nemusí být izolován. Vodiče nemají nosné ocelové jádro a hliníková lana slouží zároveň jako nosná — podle konstrukce vodiče mohou být nosná všechna lana nebo jen PEN vodič. Vedení je zachyceno pomocí kotevních svorek na zdech domů nebo sloupech. Připojení odběratele se realizuje přípojkovými svorkami, které jsou konstruovány tak, aby samy patřičným způsobem narušily izolaci bez nutnosti ji odstraňovat.



Obrázek 7.4: LV ABC vodiče⁷

Tato vedení mají mnoho výhod oproti vedením s holými vodiči:

- bezpečnost — doplněno o ochranu izolací,
- spolehlivost — menší náchylnost ke zkratům,
- malé nároky na udržování okolí vedení (stříhání stromů a keřů),

⁵MUDRUŇKOVÁ, Anna. Elektrotechnické materiály I. [online]. VOŠ a SPŠ elektrotechnická Františka Křížka, 2016 [cit. 2019-04-01]. ISBN 978-80-88058-90-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/08.html>

⁶FEJT, Z., ČERMÁK, J.: Elektroenergetika. Skripta ČVUT, Praha: 1985.

⁷LV Aerial Bundled Conductor (ABC) Cables to IEC 60502 Standard. TANO CABLE [online]. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <http://www.tanocable.com/products/overhead-cable/lv-abc/lvabc-cables-to-iec-60502.html>

- snazší instalace pomocí kotevních svorek,
- snazší instalace zkřížených vedení,
- vyšší mechanická odolnost.

Nejrozšířenějším typem těchto vedení je vedení složené z vodičů 1-AES: všechny čtyři vodiče jsou izolované, stejného průřezu a zároveň nosné. Jmenovité napětí je 600 V fázových či 1 000 V sdružených.

7.3.2 Kabelové

Kabely mohou být zavěšené (nadzemní) nebo podzemní. Závěsné kabely mají navíc ocelové nosné lano opatřené izolací vně pláště. Podzemní kabelová vedení se proti poškození chrání uložením v pískovém loži nebo v kabelových chráničkách.

Používané kabely pro pevné uložení jsou 1-AYKY-J, kde jednotlivé znaky mají význam⁸:

- 1 — jmenovité napětí 600 V fázových, 1 000 V sdružených,
- A — hliníkové jádro,
- Y — PVC izolace žil,
- K — kabel,
- Y — plášť z PVC,
- J — jedna žlutozelená žíla.

Na Obrázku 7.5 je znázorněn kabel AYKY 4×240 SM.⁹

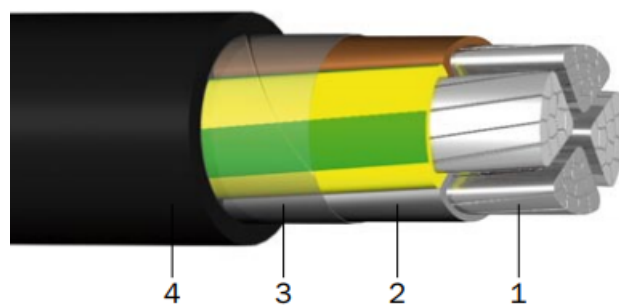
Připojení odběratelů jsou realizována pomocí smyčkování v HDS¹⁰ a odbočování v T spojkách uložených nepřístupně v zemi v závislosti na ekonomické výhodnosti realizace dané přípojky. Tato zapojení jsou znázorněna na Obrázku 7.6 a Obrázku 7.7. Obecně je nevhodné používat T spojky ve stávajících smyčkových sítích a při připojování větších odběratelů (bytové domy, výroby).¹¹

⁸ČSN 33 0166: Označování žil kabelů a ohebných šňůr. 2. vyd. Praha : ÚNMZ, 2002.

⁹SM — jádro nekulatého (nejčastěji výsečového tvaru) plného nebo složeného z lanek.

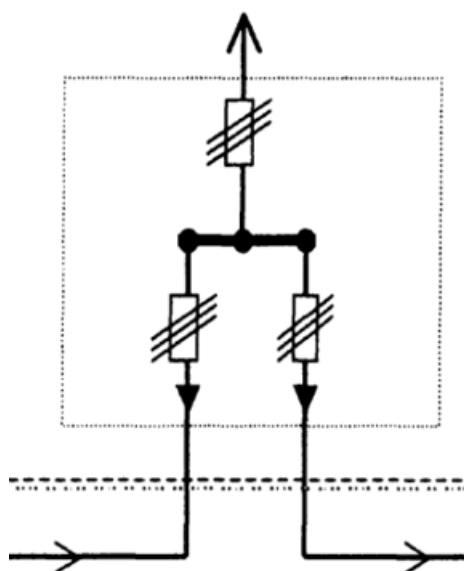
¹⁰HDS (hlavní domovní skříň) definují Připojovací podmínky NN ČEZ Distribuce, a.s. jako pojistkovou skříň, ve které je ukončena přípojka. Tento dokument, mimo jiné, zároveň klade požadavky na provedení a umístění HDS.

¹¹TECHNICKÁ POLITIKA - ROZVOJ DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ A TECHNOLOGICKÝCH PRVKŮ V DSO: PŘÍLOHA č.1 — KONCEPCE KABELOVÝCH SÍTÍ NN [online]. s. 5. ČEZ Distribuce, a. s. Oddělení Technická politika, 2006 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/technicke-informace/priloha-1.doc>



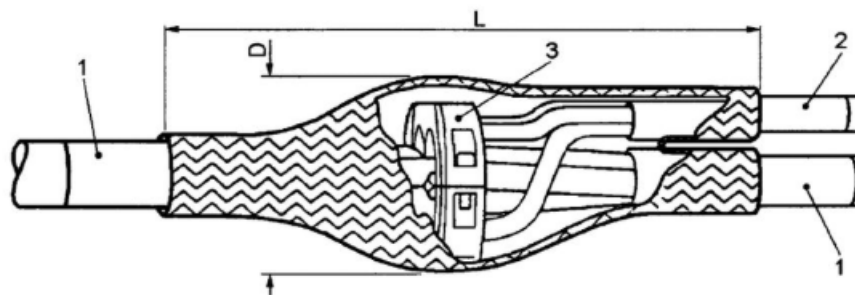
- 1 | Al jádro (RE, RM, SM)
- 2 | Izolace (PVC), žíly jsou stočené do duše kabelu
- 3 | Obal (plastová páska nebo výplňová guma)
- 4 | Plášť (PVC černý, odolný proti UV záření)

Obrázek 7.5: Kabel 1-AYKY-J 4×240 SM¹²



Obrázek 7.6: Smyčkování v HDS (vodorovně hlavní vedení, vertikálně pří-
vod k odběrateli)¹³

¹²1-AYKY: Zemní kabely s PVC izolací a PVC pláštěm [online]. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.prakab.cz/upload/1_AYKY.pdf



Obrázek 7.7: Připojení pomocí T spojky (1 — hlavní vedení, 2 — připojení odběratele)¹³

7.4 HDO

HDO (hromadné dálkové ovládání) je způsob řízení distribučních soustav z hlediska regulace odběru. Slouží především ke spínání elektrotepelných zařízení, jako jsou například ohřev TUV, akumulární vytápění nebo tepelná čerpadla. V souvislosti s tím zavádí distributor dva tarify (VT - vysoký tarif, NT - nízký tarif), kde se právě snížením ceny elektřiny v nízkém tarifu snaží motivovat odběratele k využívání HDO, čímž rozšiřuje svoje regulační možnosti. K přijímání signálu HDO slouží HDO přijímače umístěné v elektroměrových rozváděčích. Signál nejčastěji o frekvenci 216 a 2/3 Hz je modulován na každou fázi síťového napětí v rozvodnách VN a VVN. Signál se soustavou šíří přes vedení a transformátory až k přijímačům HDO, které ovládají napájecí stykače příslušných zařízení.

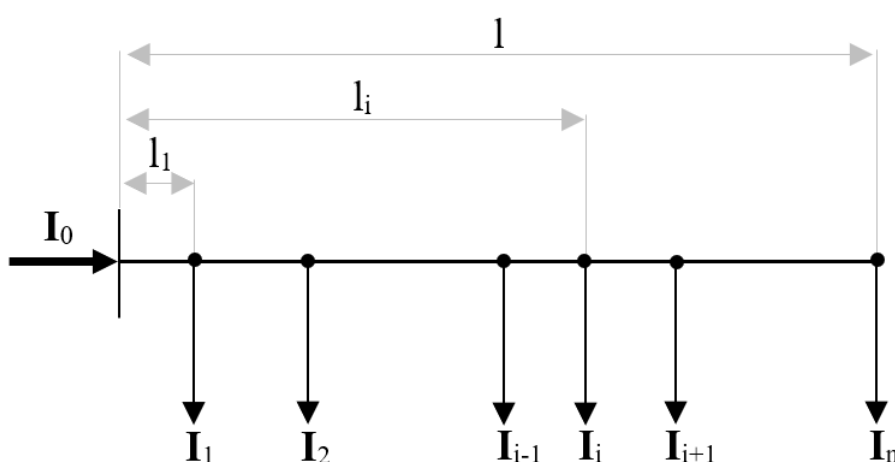
¹³BERNKOPF, Jaroslav. Venkovní a kabelová vedení [online]. s. 24 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: http://www.bernkopf.cz/skola/predmety/silnoproud/materialy/prezentace/vedeni_venkovni_a_kabelova.pptx

8. Napěťové a proudové poměry

8.1 Symetricky zatížený vývod bez zdroje

Budeme-li uvažovat situaci bez decentralizovaných zdrojů, pak ve směru od napájecího bodu průběžně klesá napětí.

Na Obrázku 8.1 je znázorněno jednostranně napájené průběžné třífázové symetricky zatížené vedení. Vedení má měrnou délkovou impedanci \mathbf{Z}_{lv} (Ωkm^{-1}). Průchod proudu vyvolá na každém úseku mezi body i a $i+1$, tedy $l_{i(i+1)}$ (km), komplexní úbytek fázového napětí $\Delta\mathbf{U}_{f,i(i+1)}$ (V).



Obrázek 8.1: Jednostranně napájené vedení bez zdrojů

Jednoduše lze odvodit, že pro úseky platí:

$$\Delta\mathbf{U}_{f,(i+1)n} = \mathbf{Z}_{lv} \cdot l_{(i+1)n} \cdot \mathbf{I}_n,$$

$$\Delta\mathbf{U}_{f,i(i+1)} = \mathbf{Z}_{lv} \cdot l_{(i+1)n} \cdot \mathbf{I}_n + \mathbf{Z}_{lv} \cdot l_{i(i+1)} \cdot \mathbf{I}_{i+1},$$

...

Celkový úbytek napětí je pak součtem úbytků podél celého vývodu:

$$\Delta\mathbf{U}_{f,\text{ved}} = \mathbf{Z}_{lv} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot \mathbf{I}_i \quad [\text{V}; \Omega\text{km}^{-1}; \text{km}; \text{A}]. \quad (8.1)$$

Položíme-li $\mathbf{Z}_{lv} = R_{lv} + j \cdot X_{lv}$ a $\mathbf{I} = I_{\check{c}} + j \cdot I_j$, pak roznásobením a úpravou (8.1) získáme:

$$\Delta U_{f,ved} = R_{lv} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_{\check{c}i} \pm X_{lv} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_{ji} + j \cdot (R_{lv} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_{ji} \mp X_{lv} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_{\check{c}i}) \stackrel{\text{IND}}{\text{KAP}} \quad (8.2)$$

$$[\text{V}; \Omega\text{km}^{-1}; \text{km}; \text{A}; \Omega\text{km}^{-1}; \text{km}; \text{A}; 1; \Omega\text{km}^{-1}; \text{km}; \text{A}; \Omega\text{km}^{-1}; \text{km}; \text{A}],$$

kde

- R_{lv} (Ωkm^{-1}) je měrná rezistance vedení,
- X_{lv} (Ωkm^{-1}) je měrná reaktance vedení,
- $I_{\check{c}}$ (A) je činná složka proudu,
- I_j (A) je jalová složka proudu,
- l (km) je délka úseku,
- $\stackrel{\text{IND}}{\text{KAP}}$ popisuje charakter jalového proudu.

Reálná část rovnice (8.2) popisuje velikost úbytku napětí, imaginární pak změnu fáze.

Zanedbáním imaginární složky lze určit úbytek napětí jako:

$$\Delta U_{f,ved} \doteq R_{lv} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_{\check{c}i} \pm X_{lv} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot I_{ji} \stackrel{\text{IND}}{\text{KAP}} \quad (8.3)$$

$$[\text{V}; \Omega\text{km}^{-1}; \text{km}; \text{A}; \Omega\text{km}^{-1}; \text{km}; \text{A}].$$

Vhodnou úpravou pravé strany rovnice (8.3) v podobě rozšíření o $3 \cdot U$ (V) ji lze zapsat pomocí výkonů:

$$\Delta U_{f,ved} \doteq \frac{R_{lv} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot P_i \pm X_{lv} \cdot \sum_{i=1}^n l_i \cdot Q_i}{3 \cdot U_f} \stackrel{\text{IND}}{\text{KAP}} \quad (8.4)$$

$$[\text{V}; \Omega\text{km}^{-1}; \text{km}; \text{W}; \Omega\text{km}^{-1}; \text{km}; \text{VAr}; \text{V}],$$

kde

- P (W) je činný výkon,
- Q (VAr) je jalový výkon,
- U (V) je jmenovité fázové napětí.

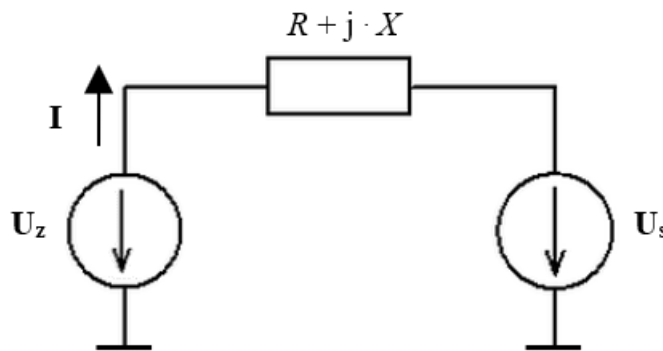
8.2 Zdroj pracující do soustavy

Na Obrázku 8.2 je znázorněn třífázový zdroj připojený k soustavě. Ze schématu vyplývá pro fázor proudu \mathbf{I} (A):

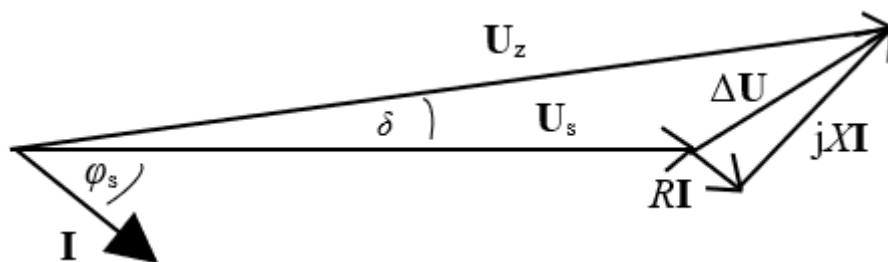
$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{U}_z - \mathbf{U}_s}{R + j \cdot X} \quad [\text{A}; \text{V}; \text{V}; \Omega; 1; \Omega], \quad (8.5)$$

kde

- \mathbf{U}_z (V) je fázor napětí zdroje,
- \mathbf{U}_s (V) je fázor napětí soustavy,
- R (Ω) je rezistance soustavy,
- X (Ω) je reaktance soustavy.



Obrázek 8.2: Zdroj připojený k soustavě



Obrázek 8.3: Fázorový diagram zdroje pracujícího do soustavy

Z fázorového diagramu na Obrázku 8.3 lze sérií kroků určit činný výkon dodávaný zdrojem:

$$P = \frac{U_z}{R^2 + X^2} \cdot [R \cdot (U_z - U_s \cdot \cos \delta) + U_s \cdot X \cdot \sin \delta] \quad (8.6)$$

$$[\text{W}; \text{V}; \Omega; \text{V}; \text{V}; \text{rad}; \text{V}; \Omega; \text{rad}; \Omega; \Omega],$$

jalový výkon pak:

$$Q = \frac{U_z}{R^2 + X^2} \cdot [X \cdot (U_z - U_s \cdot \cos \delta) + U_s \cdot R \cdot \sin \delta] \quad (8.7)$$

$$[\text{VAr}; \text{V}; \Omega; \text{V}; \text{V}; \text{rad}; \text{V}; \Omega; \text{rad}; \Omega; \Omega],$$

kde

- U_z (V) je velikost napětí zdroje,
- U_s (V) je velikost napětí soustavy,
- δ (rad) je úhel přenosu — úhel mezi fázory \mathbf{U}_z a \mathbf{U}_s .

Je-li úhel δ (rad) malý, což je běžný stav, pak platí, že $\sin \delta \rightarrow \delta$ a $\cos \delta \rightarrow 1$ a rovnice (8.6) (8.7) lze upravit:

$$P = \frac{U_z}{R^2 + X^2} \cdot [R \cdot (U_z - U_s) + U_s \cdot X \cdot \delta] \quad (8.8)$$

$$[\text{W}; \text{V}; \Omega; \text{V}; \text{V}; \text{rad}; \text{V}; \Omega; \text{rad}; \Omega; \Omega],$$

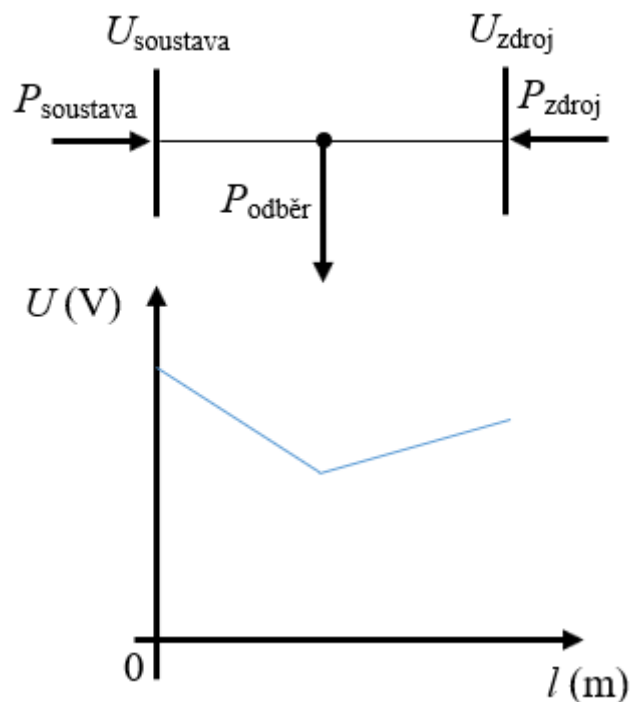
$$Q = \frac{U_z}{R^2 + X^2} \cdot [X \cdot (U_z - U_s) + U_s \cdot R \cdot \delta] \quad (8.9)$$

$$[\text{VAr}; \text{V}; \Omega; \text{V}; \text{V}; \text{rad}; \text{V}; \Omega; \text{rad}; \Omega; \Omega].$$

S přihlédnutím k velikosti úhlu δ (rad) a spíše odporovému charakteru soustav nízkého napětí můžeme z rovnic (8.8) a (8.9) konstatovat, že dodávaný činný výkon je úměrný rozdílu velikostí napětí zdroje a soustavy, jalový pak úhlu mezi fázory napětí zdroje a soustavy (úhel přenosu). Rovnice jsou spolu samozřejmě svázány a změna hodnoty jednoho z těchto parametrů v jedné rovnici ve větší či menší míře ovlivní i výsledek rovnice druhé.

V případě připojení zdroje dojde v daném bodě ke zvýšení napětí. Na Obrázku 8.4 je znázorněna situace s jedním úsekem vedení stejných parametrů po celé délce, jedním odběrem a jedním zdrojem. Uvažujeme zatím toky pouze činných výkonů. Výkon dodávaný zdrojem je menší než výkon odběru.

Pokud by byla výroba vyšší, docházelo by k přetoku výkonu do zbylé části soustavy a napětí by ve znázorněném případě lineárně se zlomem v bodě odběru klesalo směrem od zdroje.



Obrázek 8.4: Napěťový profil úseku s jedním odběrem a jedním zdrojem

8.3 Regulace jalového výkonu

8.3.1 Charakter jalového výkonu

Pro kapacitanci \mathbf{X}_C (Ω) a induktanci \mathbf{X}_L (Ω) platí:

$$\mathbf{X}_C = -j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} \quad [\Omega; 1; \text{s}^{-1}; \text{F}], \quad (8.10)$$

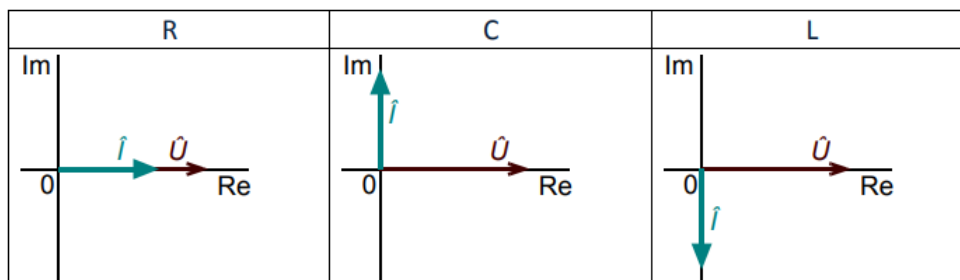
$$\mathbf{X}_L = j \cdot \omega \cdot L \quad [\Omega; 1; \text{s}^{-1}; \text{H}], \quad (8.11)$$

kde

- C (F) je kapacita,
- L (H) je indukčnost,
- ω (s^{-1}) je úhlová frekvence.

Použitím Ohmova zákona v komplexním tvaru pro tyto prvky $\mathbf{U} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{I}$ [$\text{V}; \Omega; \text{A}$] zjistíme, že napětí na kapacitoru je otočeno o $-\pi/2$ a na induktoru o $+\pi/2$ oproti proudu¹.

¹Násobení $-j$ odpovídá otočení o $-\pi/2$, násobení j pak otočení o $\pi/2$.


 Obrázek 8.5: Fázory napětí a proudu ideálních R, C, L prvků²

Pro zdánlivý výkon \mathbf{S} (VA) platí³:

$$\mathbf{S} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{I}^* = \frac{U^2}{\mathbf{Z}} = I^2 \cdot \mathbf{Z} \quad [\text{VA}; \text{V}; \text{A}; \text{V}; \Omega; \text{A}; \Omega], \quad (8.12)$$

kde

- \mathbf{U} (V) je fázor napětí,
- \mathbf{I}^* (A) je komplexně sdružený fázor proudu,
- \mathbf{Z} (Ω) je impedance,
- U (V) je efektivní hodnota napětí,
- I (A) je efektivní hodnota proudu.

Fázor zdánlivého výkonu lze rozložit na reálnou složku — činný výkon P (W) — a imaginární složku — jalový výkon Q (VAr):

$$P = \text{Re}\{\mathbf{S}\} = S \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}; \text{VA}; \text{VA}; \text{rad}], \quad (8.13)$$

$$Q = \text{Im}\{\mathbf{S}\} = S \cdot \sin \varphi \quad [\text{VAr}; \text{VA}; \text{VA}; \text{rad}], \quad (8.14)$$

kde

- S (VA) je velikost fázoru zdánlivého výkonu,
- φ je fázový rozdíl fázoru napětí a fázoru proudu: $\varphi = \varphi_{\mathbf{U}} - \varphi_{\mathbf{I}}$.

Pokud vyjádříme zdánlivý výkon kapacitoru ($\mathbf{Z} = \mathbf{X}_C$) a induktoru ($\mathbf{Z} = \mathbf{X}_L$), zjistíme, že má pouze imaginární složky — jalový výkon⁴:

$$\mathbf{S}_C = j \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C \quad \Rightarrow \quad Q_C = -U^2 \cdot \omega \cdot C, \quad (8.15)$$

²HARMONICKÝ USTÁLENÝ STAV — FÁZOR, IMPEDANCE [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://amber.feld.cvut.cz/vyu/eo1/files/lectures/Prednaska8.pdf>

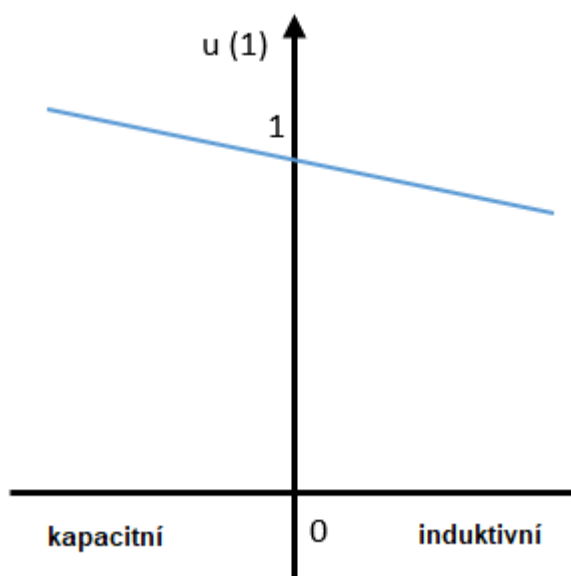
³Pro obecné komplexní číslo \mathbf{A} platí: $\mathbf{A} \cdot \mathbf{A}^* = |\mathbf{A}| = A$.

⁴Důvodem změn znamének je naše definice φ (rad).

$$\mathbf{S}_L = -j \cdot \frac{U^2}{\omega \cdot L} \Rightarrow Q_L = \frac{U^2}{\omega \cdot L}. \quad (8.16)$$

Z rovnic (8.15) a (8.16) vyplývá důležitý závěr: kapacitory jsou zdroje jalového výkonu (záporný výkon při spotřebičové orientaci) a induktory jalový výkon naopak odebírají, respektive příslušné fázové posuvy napětí a proudu odpovídají těmto vlastnostem.

Na Obrázku 8.6 je znázorněna závislost poměrného napětí v přípojném bodě na charakteru jalového výkonu.



Obrázek 8.6: Vliv charakteru prvku na napětí

Účinník

Vyjádříme-li z rovnice (8.13) $\cos \varphi$, získáme:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad [1; W; VA]. \quad (8.17)$$

Tuto veličinu nazýváme *účinník*, který neudává nic jiného než obsah činné složky výkonu v celkovém (zdánlivém) výkonu. Distribuční společnosti vyžadují udržovat hodnotu účinníku v odběrném místě v rozmezí 0,95 až 1 induktivní.

V síti se mohou objevovat stejnosměrná složka a vyšší harmonické složky proudů a napětí. Pro celkový zdánlivý výkon platí:

$$S = U \cdot I = \sqrt{\left(\sum_{i=0}^{\infty} U_i^2\right) \cdot \left(\sum_{i=0}^{\infty} I_i^2\right)} \quad [VA; V; A; V; A]. \quad (8.18)$$

Deformační výkon D (VAr) lze pak vyjádřit:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad [\text{VAr}; \text{VA}; \text{W}; \text{VAr}], \quad (8.19)$$

kde

$$P = \sum_{i=0}^{\infty} U_i \cdot I_i \cdot \cos \varphi_i \quad [\text{W}; \text{V}; \text{A}; \text{rad}], \quad (8.20)$$

$$Q = \sum_{i=0}^{\infty} U_i \cdot I_i \cdot \sin \varphi_i \quad [\text{VAr}; \text{V}; \text{A}; \text{rad}]. \quad (8.21)$$

Účinník respektující vliv nelineárních zařízení se nazývá *opravdový účinník* λ (1) a je definován pomocí (8.18), (8.19), (8.20), (8.21):

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{P + Q + D} \quad [1; \text{W}; \text{VA}; \text{W}; \text{W}; \text{VAr}; \text{VAr}]. \quad (8.22)$$

Činný výkon koná práci — lze ho přeměnit na mechanickou energii pomocí točivých strojů. Nejrozšířenější zátěží je indukční. Motory odebírají ze soustavy jalový proud, který využívají k vytvoření magnetického pole, obdobně transformátory. Jalový výkon mechanickou prací nekoná, avšak jalový proud jako složka zdánlivého proudu způsobuje tepelné ztráty na rezistancích.

Pokud chceme nejvíce využívat přenosové schopnosti vedení, pak se snažíme obsah jalové složky eliminovat použitím kompenzačního zařízení, které je zdrojem jalového výkonu, v blízkosti zátěže. Tento výkon pak teče pouze mezi kompenzátorem a zátěží a nezatěžuje zbylou část soustavy. Na druhou stranu nám ale injektování a odebírání jalového výkonu pomáhá regulovat napětí v soustavě.

8.3.2 Řízení jalového výkonu zdroje napětím — $Q(U)$ regulace

Uvažme jeden vývod s n uzly, viz Obrázek 8.7. V každém uzlu se nachází odběr a zároveň zdroj. Výkony tekoucí podél vývodu budeme značit velkými písmeny, výkony odběrů a zdrojů písmeny malými.

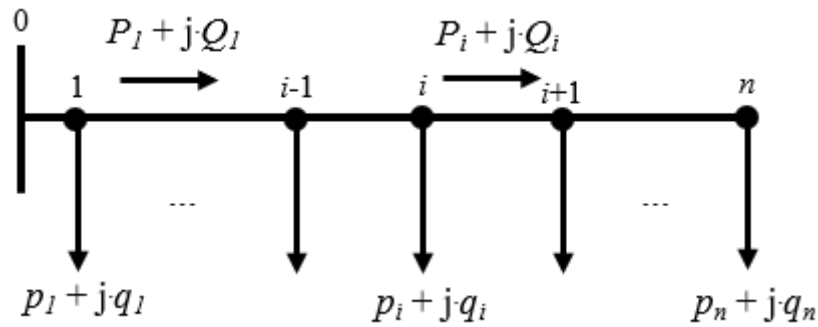
Pro každý uzel platí:

$$p_i + j \cdot q_i = (p_i^o - p_i^z) + j \cdot (q_i^o - q_i^z) \quad (8.23)$$

$$[\text{W}; 1; \text{VAr}; \text{W}; \text{W}; 1; \text{VAr}; \text{VAr}],$$

kde

- p (W) je činný výkon,
- q (VAr) je jalový výkon,
- index o značí odběr,
- index z značí zdroj.



Obrázek 8.7: Toky výkonů

Pro činný výkon vytékající z i -tého uzlu podél vývodu platí:

$$P_i = P_{i-1} - p_i^o + p_i^z \quad [\text{W}; \text{W}; \text{W}; \text{W}] \quad (8.24)$$

a pro jalový:

$$Q_i = Q_{i-1} - q_i^o + q_i^z \quad [\text{VAr}; \text{VAr}; \text{VAr}; \text{VAr}]. \quad (8.25)$$

Nyní zhodnotíme, které výkony je možné regulovat. Nepředpokládáme zásahy jiných regulátorů (HDO). Pak není možné ovlivnit činný ani jalový výkon odběrů. Činný výkon zdrojů předpokládáme také neměnný. Můžeme tedy řídit pouze dodávku (odběr) jalového výkonu. Žádanou veličinou pro regulační smyčku je napětí, které se snažíme udržovat v přípojném bodě.

Meze řízení jsou ovšem limitovány — zdroj musí dodávat činný výkon a také je nutné nepřetížit zdroj. Tedy udržovat okamžitý zdánlivý výkon do hodnoty jmenovitého zdánlivého výkonu zdroje, případně po určitou dobu ve vyšších hodnotách dovolených výrobcem zařízení. Pak pro velikost maximálního jalového výkonu $|q_{\max,i}^z|$ (VAr) platí rovnice (8.26).

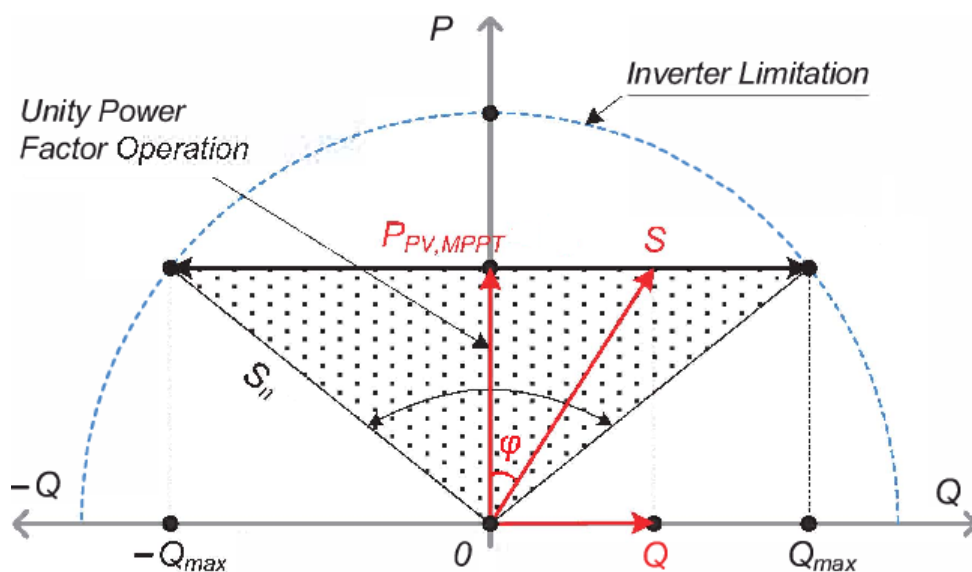
$$|q_{\max,i}^z| = \sqrt{(s_{n,i}^z)^2 - (p_i^z)^2} \quad [\text{VAr}; \text{VA}; \text{W}], \quad (8.26)$$

kde

- $q_{\max,i}^z$ (VAr) je maximální jalový výkon zdroje při dané dodávce činného výkonu p_i^z ,
- $s_{n,i}^z$ (VA) je jmenovitý zdánlivý výkon zdroje.

Abychom tedy měli jistou regulační rezervu, je výhodné, aby jmenovitý zdánlivý výkon zdroje byl vyšší než maximální provozní činný výkon. Některé provedené simulace prokázaly, že rezerva 10 % zdánlivého výkonu fotovoltaických střídačů je dostačující pro většinu regulačních zásahů⁵.

Na Obrázku 8.8 je znázorněn PQ diagram střídače. Není vhodné, aby střídač dodával činný výkon o velikosti jmenovitého zdánlivého výkonu. Pak by totiž v okamžiku zásahu $Q(U)$ regulace došlo zároveň ke snížení dodávky činného výkonu, což je další způsob regulace.



Obrázek 8.8: PQ diagram fotovoltaického střídače⁶

⁵Options for Control of Reactive Power by Distributed Photovoltaic Generators [online]. 2011 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://www.mit.edu/turitsyn/assets/pubs/Turitsyn2011fv.pdf>

⁶PQ-diagram for a single-phase PV inverter. Research Gate [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/PQ-diagram-for-a-single-phase-PV-inverter_fig4_260316832

8.3.3 Regulace činného výkonu zdroje napětím — P(U) regulace

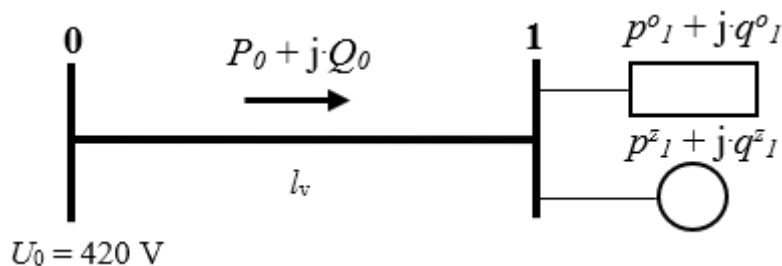
Regulace činného výkonu napětím je pro provozovatele výrobní ekonomicky nevýhodná kvůli omezování prodáváného výkonu. Tuto regulaci je proto vhodné použít až v případě, kdy se dosáhlo krajního limitu $Q(U)$ regulace.

Zajímavé je porovnat $Q(U)$ a $P(U)$ regulaci. V soustavě NN dosáhneme dle (8.4) stejné změny napětí při větším jalovém výkonu oproti výkonu činnému kvůli jejímu spíše odporovému charakteru. Vyšší hodnota jalového proudu pak také způsobí větší ztráty na vedení.

8.4 Příklad výpočtu

V této části si názorně ukážeme důsledky předchozích úvah.

Uvažujme zapojení na Obrázku 8.9. Například výrobní podnik je připojen pomocí kabelu 1-AYKY-J $3 \times 240 + 120$. Výkon odběru je třífázový a činí $p_1^o = 50$ kW při induktivním účinníku $\cos \varphi^o = 0,95$. Do stejného uzlu je zapojen fotovoltaický zdroj o výkonu $p_1^z = 100$ kW třífázově. Výpočty určíme napětí v přípojném bodě, pokud není připojen zdroj, následně budeme uvažovat zdroj dodávající činný výkon při účinníku $\cos \varphi_a^z = 1$ a v poslední řadě zdroj pracující s odebíraným jalovým výkonem s účinníkem $\cos \varphi_b^z = 0,9$. Určíme poměrné zvýšení napětí vyvolané připojením zdroje. Jalový výkon kabelu a ztráty neuvažujeme. Pro zjednodušení nebudeme uvažovat úbytek napětí v přípojném bodě vývodu a předpokládáme zde konstantní sdružené napětí $U_0 = 420$ V.



Obrázek 8.9: Příklad výpočtu

Zadané hodnoty:

$$U_0 = 420 \text{ V}$$

$$R_{lv} = 0,1250 \text{ } \Omega \text{km}^{-1}$$

$$X_{lv} = 0,0754 \text{ } \Omega \text{km}^{-1}$$

$$l_v = 300 \text{ m}$$

$$p_1^o = 50 \text{ kW}$$

$$\cos \varphi^o = 0,95 \text{ ind.}$$

$$p_1^z = 100 \text{ kW}$$

$$\cos \varphi_a^z = 1$$

$$\cos \varphi_b^z = 0,90 \text{ ind.}$$

8.4.1 Bez připojeného zdroje

Rezistance vedení:

$$R_v = R_{v1} \cdot l_v = 0,1250 \cdot 0,3 = 0,0375 \text{ } \Omega,$$

reaktance vedení:

$$X_v = X_{v1} \cdot l_v = 0,0754 \cdot 0,3 = 0,0226 \Omega.$$

Úhel odběru:

$$\varphi^\circ = \arccos 0,95 = 0,3176 \text{ rad},$$

odebíraný jalový výkon:

$$Q_0 = q_1^\circ = \frac{p_1^\circ}{\cos \varphi^\circ} \cdot \sin \varphi^\circ = \frac{50}{0,95} \cdot 0,3123 = 16,4 \text{ kVAr}.$$

Úbytek napětí na vedení vyjádřený ve sdružených hodnotách je:

$$\Delta U_{v, \text{bez}} = \frac{R_v \cdot P_0 + X_v \cdot Q_0}{U_0} = \frac{0,0375 \cdot 50 \cdot 10^3 + 0,0226 \cdot 16,4 \cdot 10^3}{420} = 5,35 \text{ V},$$

napětí v bodě 1 je tedy:

$$U_{1, \text{bez}} = U_0 - \Delta U_{v, \text{bez}} = 420 - 5,35 = 414,65 \text{ V}.$$

8.4.2 Účinitk zdrojje $\cos \varphi_a^z = 1$

Činný výkon uzlu 0 má hodnotu:

$$P_0 = p_1^\circ - p_1^z = 50 - 100 = -50 \text{ kW}.$$

Záporný činný výkon značí v souladu se znaménkovou konvencí tok výkonu směrem do přípojného bodu 0. Zdroj nepracuje s žádným jalovým výkonem. Jalový výkon odběru je stále stejný, a tedy $Q_0 = q_1^\circ = 16,4 \text{ kVAr}$. Pak úbytek napětí na vedení činí:

$$\Delta U_{v, a} = \frac{R_v \cdot P_0 + X_v \cdot Q_0}{U_0} = \frac{0,0375 \cdot (-50 \cdot 10^3) + 0,0226 \cdot 16,4 \cdot 10^3}{420} = -3,58 \text{ V},$$

záporný úbytek nám značí nárůst, napětí v bodě 1 je pak:

$$U_{1, a} = U_0 - \Delta U_{v, a} = 420 - (-3,58) = 423,58 \text{ V}.$$

Relativní nárůst napětí vyvolaný připojením zdroje činí:

$$\Delta u_a = \frac{|U_{v, a}|}{U_{1, \text{bez}}} \cdot 100 = \frac{3,58}{414,65} \cdot 100 = 0,86 \text{ \%}.$$

8.4.3 Účinník zdroje $\cos \varphi_b^z = 0,9$ ind.

Pro činný výkon v uzlu 0 platí opět:

$$P_0 = p_1^o - p_1^z = 50 - 100 = -50 \text{ kW}.$$

Zdroj odebírá jalový výkon s účínkem $\cos \varphi_b^z = 0,9$. Tato hodnota účínku odpovídá fázovému posunu napětí a proudu:

$$\varphi_b^z = \arccos 0,9 = 0,4510 \text{ rad},$$

jalový výkon zdroje je pak:

$$q_1^z = \frac{p_1^z}{\cos \varphi_b^z} \cdot \sin \varphi_b^z = \frac{100}{0,9} \cdot \sin 0,4510 = 48,4 \text{ kVAr},$$

a celkový jalový výkon v bodě 0 činí:

$$Q_0 = q_1^o + q_1^z = 16,4 + 48,4 = 64,8 \text{ kVAr}.$$

Úbytek napětí na vedení:

$$\Delta U_{v, b} = \frac{R_v \cdot P_0 + X_v \cdot Q_0}{U_0} = \frac{0,0375 \cdot (-50 \cdot 10^3) + 0,0226 \cdot 64,8 \cdot 10^3}{420} = -1,86 \text{ V},$$

napětí v bodě 1 je:

$$U_{1, b} = U_0 - \Delta U_{v, b} = 420 - (-1,86) = 421,86 \text{ V}.$$

A relativní nárůst napětí vyvolaný připojením zdroje je:

$$\Delta u_b = \frac{|U_{v, b}|}{U_{1, \text{bez}}} \cdot 100 = \frac{1,86}{414,65} \cdot 100 = 0,45 \text{ \%}.$$

8.4.4 Shrnutí

V této části jsme si na zjednodušeném výpočtu předvedli vliv zdroje na napětové poměry a vliv $Q(U)$ regulace. Změna napětí vyvolaná připojením zdroje pracujícího s účínkem $\cos \varphi_a^z = 1$ činí $\Delta u_a = 0,86 \text{ \%}$. Začne-li zdroj odebírat jalový výkon s účínkem $\cos \varphi_b^z = 0,9$, pak změna napětí činí $\Delta u_b = 0,45 \text{ \%}$.

Zvýšení připojitelného výkonu s ohledem na maximální dovolené zvýšení napětí pomocí zavedení $Q(U)$ regulace tedy spočívá v tom, že zdroj začne odebírat ze soustavy jalový výkon (nebo snižovat velikost do soustavy dodávaného), čímž sníží napětí v daném uzlu. Pak zdroj může dodávat vyšší činný výkon. Samozřejmě s ohledem na proudové zatížení vedení a napájecího transformátoru a také další sledované veličny dané PPDS.

8.5 Nesymetrie napětí a proudu

Vznik napěťové nesymetrie je dán nestejným odběrem výkonu z jednotlivých fází. Na různě zatížených fázových vodičích vznikají nestejně úbytky napětí, což deformuje hvězdu napětí jak z hlediska velikosti napětí, tak i fázového posuvu. Tento stav může mít negativní vliv na zapojená zařízení.

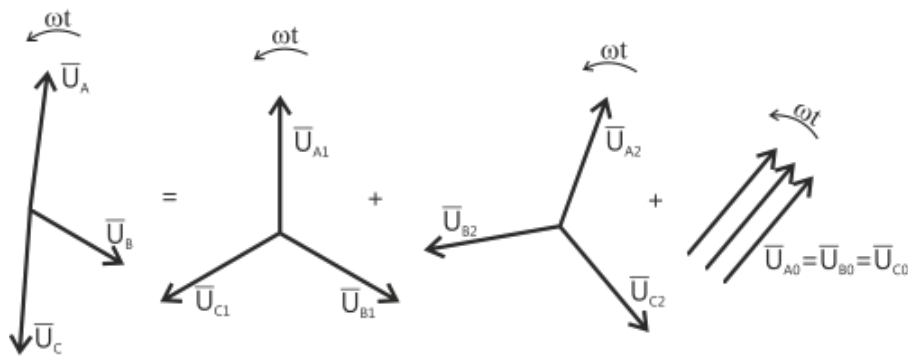
Vzhledem k charakteru zařízení zapojovaných do soustav NN (většina jednofázových) je tento jev běžný, avšak v sítích dochází s roustoucím počtem připojených zařízení k samovolné symetrizaci.

8.5.1 Metoda souměrných složek

K řešení nesymetrických stavů je možné použít metodu souměrných složek. Libovolný nesymetrický průběh napětí lze rozložit na tři složky, viz Obrázek 8.10. Následující úvahy platí i pro proud.

Jednotlivé číselné indexy značí souměrné složky, písmenné indexy fáze napětí. Souměrné složky označujeme jako:

- index 1 — sousledná složka,
- index 2 — zpětná složka,
- index 0 — netočivá složka,
- (bez číselných indexů — původní nesymetrický průběh).



Obrázek 8.10: Rozklad průběhu napětí metodou souměrných složek⁷

Pro jednotlivé fázory původního napětí platí fázorový součet složek. Zvolíme-li jako referenční fázi fázi A, pak lze původní nesymetrická napětí zapsat po úpravě maticově:

⁷Distribuční síť velmi vysokého napětí 04: Metoda souměrných složek [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: https://www.energetikainfo.cz/33/distribucni-site-velmi-vysokeho-napeti-04-metoda-soumerych-slozek-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4Ev1_nn3lxjM1rRczQjhPOznVRYFLS2WAvA/

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_A \\ \mathbf{U}_B \\ \mathbf{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} & 1 \\ \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_0 \end{bmatrix} \quad [V; 1; V], \quad (8.27)$$

kde

- $\mathbf{U}_{A, B, C}$ (V) jsou fázová napětí,
- $\mathbf{U}_{1, 2, 0}$ (V) jsou složková napětí,
- $\mathbf{a} = \exp\left(\frac{2}{3}\pi\right)$,
- $\mathbf{a}^2 = \exp\left(\frac{4}{3}\pi\right)$.

Vyjádříme-li z maticové rovnice (8.27) složkové fázory, získáme:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{U}_A \\ \mathbf{U}_B \\ \mathbf{U}_C \end{bmatrix} \quad [V; 1; V]. \quad (8.28)$$

Jednotlivé složky mají fyzikální interpretaci. Zdrojem sousledné složky jsou generátory, zpětná a netočivá složka jsou způsobeny nesymetrií, přičemž aby vznikla netočivá složka, musí v dané třífázové soustavě existovat čtvrtý (střední) vodič, případně zem nebo obojí.

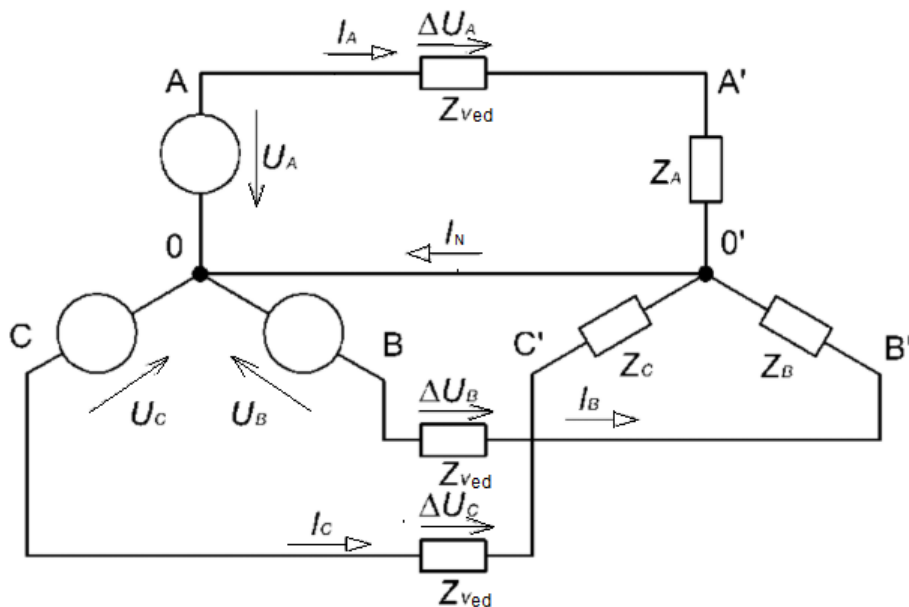
8.5.2 Třífázová soustava se středním vodičem

Jak bylo uvedeno v kapitole 8. Soustavy NN, soustavy nízkého napětí jsou na straně distributora provozovány jako čtyřvodičové a vodič PEN slučuje funkci ochranného (PE) a pracovního středního (N) vodiče.

Aby byly dodrženy požadavky na impedanci poruchových smyček dle normy ČSN 33 2000 ed. 2, tak se v hlavních rozvaděcích odběratelů vodič PEN při rozdělování na vodič PE a N ještě přizemňuje. Při nesymetrickém zatížení se proud tekoucí zpět do uzemněného uzlu transformátoru dělí v uzlech uzemnění mezi samotný PEN vodič a zem. Zároveň se v těchto uzlech proud z jiných uzlů fázorově skládá s proudy tohoto uzlu danými nesymetrií zařízení tohoto uzlu a situace se tak velmi komplikuje.

Zde si nastíníme situaci, při které třífázový symetrický zdroj v zapojení do hvězdy napájí nesymetrickou zátěž zapojenou do hvězdy, viz Obrázek 8.11.

⁸HAVLÍČEK, Václav, Martin POKORNÝ a Ivan ZEMÁNEK. Elektrické obvody. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014-. ISBN 978-80-01-05492-5.



Obrázek 8.11: Nesymetrická třífázová zátěž zapojená do hvězdy⁸

Pro proud středním vodičem \mathbf{I}_N (A) platí:

$$\mathbf{I}_N = \mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C \quad [\text{A}; \text{A}; \text{A}; \text{A}], \quad (8.29)$$

kde

- $\mathbf{I}_A, \mathbf{I}_B, \mathbf{I}_C$ (A) jsou fázové proudy.

Pomocí metody smyčkových proudů lze získat vztahy pro fázová napětí:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_A \\ \mathbf{U}_B \\ \mathbf{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_A & \mathbf{I}_N \\ \mathbf{I}_B & \mathbf{I}_N \\ \mathbf{I}_C & \mathbf{I}_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{\text{ved}} \\ \mathbf{Z}_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_A \cdot \mathbf{I}_A \\ \mathbf{Z}_B \cdot \mathbf{I}_B \\ \mathbf{Z}_C \cdot \mathbf{I}_C \end{bmatrix} \quad (8.30)$$

$$[\text{V}; \text{A}; \text{A}; \Omega; \Omega; \text{A}],$$

kde

- $\mathbf{Z}_{\text{ved}}(\Omega)$ je impedance fází vedení,
- $\mathbf{Z}_N(\Omega)$ je impedance středního vodiče,
- $\mathbf{Z}_{A, B, C}(\Omega)$ jsou impedance fází zátěže.

Určíme-li proudy jednotlivých složek, získáme:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \end{bmatrix} \quad [A; 1; A]. \quad (8.31)$$

Pokud vyjádříme složky napětí pomocí rovnice (8.28), tak pomocí těchto hodnot lze určit činitel napětové nesymetrie $\rho_U(1)$ dle (9.1), případně činitel proudové nesymetrie $\rho_I(1)$ definovaný obdobně⁹:

$$\rho_I = \frac{|\mathbf{I}_2|}{|\mathbf{I}_1|} \quad [1; A; A], \quad (8.32)$$

kde

- $\mathbf{I}_2(A)$ je zpětná složka proudu,
- $\mathbf{I}_1(A)$ je sousledná složka proudu.

Jak můžeme vidět, netočivá složka napětí ani proudu se v těchto výrazech neobjevuje, dle PPDS Příloha 4 se neuvažuje, protože pro možné rušení je rozhodující pouze zpětná složka napětí¹⁰.

⁹PNE 33 3430-3: Parametry kvality elektrické energie – Část 3: Nesymetrie a změny kmitočtu napětí. 3. 2011.

¹⁰PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV: PŘÍLOHA 4 PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ VÝROBEN A AKUMULAČNÍCH ZAŘÍZENÍ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY [online]. 2018 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2018_priloha-4.pdf

9. Pravidla provozu distribučních soustav

Pravidla provozu distribuční soustavy (PPDS) vznikla v roce 2006 na základě shody provozovatelů distribučních soustav o nutnosti sestavit dokument jasně určující požadavky na provoz distribučních soustav. Iniciací k tvorbě těchto dokumentů byly: zákon č. 458/2000 Sb. o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, navazující vyhlášky Ministerstva průmyslu a obchodu ČR a vyhlášky Energetického regulačního úřadu (ERÚ). V následujících letech byla PPDS doplňována a upravována.¹

PPDS jsou založena na technických normách a legislativních dokumentech a schvalována ERÚ.

PPDS mají celkem sedm částí (příloh). V následující části se zaměříme na Přílohu 3 o kvalitě napětí v distribuční soustavě, způsobech jejího zjišťování a hodnocení², a také na Přílohu 4 o paralelním provozu výroben a akumulčních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy³. Konkrétně se zaměříme na požadavky na hladinu nízkého napětí. Tyto požadavky a nařízení doplníme o náš komentář, případně informace z jiných zdrojů.

9.1 Příloha 3 — kvalita napětí

Charakteristiky napětí vychází z normy ČSN EN 50160 o charakteristikách napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí.

Tato příloha dále uvádí zaručované hodnoty, měřicí intervaly, doby pozorování a pravděpodobnosti splnění určených limitů.

¹Pravidla provozování distribuční soustavy 2006 [online]. 1. 2006 [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds-text-2006.pdf>

²PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUTIVNÍCH SOUSTAV: PŘÍLOHA 3 KVALITA NAPĚTÍ V DISTRIBUTIVNÍ SOUSTAVĚ, ZPŮSOBY JEJÍHO ZJIŠŤOVÁNÍ A HODNOCENÍ [online]. 2011 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2011/ppds-2011_priloha-3.pdf

³PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUTIVNÍCH SOUSTAV: PŘÍLOHA 4 PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ VÝROBEN A AKUMULAČNÍCH ZAŘÍZENÍ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DISTRIBUTIVNÍ SOUSTAVY [online]. 2018 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2018_priloha-4.pdf

V následujícím textu jsou shrnuty vybrané parametry napájecího napětí a jejich odchylky od nominálních hodnot za normálních provozních podmínek⁴.

9.1.1 Frekvence

Průměr frekvence první harmonické napětí měřené v intervalu 10 sekund musí být v mezích uvedených v Tabulce 9.1 a v Tabulce 9.2.

Odchylky frekvence — synchronní připojení	
Frekvence (Hz)	Interval
50 ±1 %	po 99,5 % roku
50 +4 % / -6 %	po 100 % času

Tabulka 9.1: Dovolené odchylky frekvence soustav se synchronním připojením do ES dle PPDS Př. 3

Odchylky frekvence — ostrovní režim	
Frekvence (Hz)	Čas
50 ±2 %	po 99 % týdne
50 ±15 %	po 100 % času

Tabulka 9.2: Dovolené odchylky frekvence soustav bez synchronního připojení do ES dle PPDS Př. 3

9.1.2 Rychlé změny napětí

Rychlé změny napětí jsou způsobovány spínáním v soustavách. Pro dlouhodobou míru flickeru (definována v části o Příloze 4) musí v distribuční soustavě po 95 % času v libovolném týdenním období platit $P_{lt} \leq 1$.

⁴Dle ČSN EN 50 160: *Normální provozní podmínky (normal operating condition): „provozní stav distribuční soustavy, která splňuje požadavky na zatížení, spínání v soustavě a odstraňování poruch automatickými ochrannými systémy, bez výskytu mimořádných stavů způsobených vnějšími vlivy nebo závažnými událostmi.“*

9.1.3 Odchyly napětí

Pro sítě NN udávané dovolené odchyly jsou v Tabulce 9.3.

Odchyly napětí	
Rozsah (% U_n)	Čas
$\pm 10\%$	po 95 % měřicích intervalů
+10 % / -15 %	po 100 % měřicích intervalů

Tabulka 9.3: Dovolené odchyly napětí na hladině NN dle PPDS Př. 3

9.1.4 Nesymetrie napětí

Činitel napěťové nesymetrie je definován jako podíl velikosti fázoru zpětné U_2 (V) a sousledné U_1 (V) složky napětí:

$$\rho_U = \frac{|U_2|}{|U_1|} \quad [1; V; V]. \quad (9.1)$$

Napěťová nesymetrie smí dosahovat maximálně 2 % průměrné efektivní hodnoty zpětné složky, a to po dobu 95 % z týdenního měření v měřicích intervalech 10 minut.

9.1.5 Vyšší harmonická napětí

Problém s emisemi vyšších harmonických napětí nastává obecně u nelineárních zařízení. Z hlediska zdrojů elektrické energie se jedná o zařízení připojená pomocí měničů jako větrné zdroje či fotovoltaika nebo zdroje buzené usměrňovači. Vyšší harmonická napětí mohou způsobovat rušení jiných zařízení, zkreslovat signál HDO či dokonce způsobit proudové přetížení středního vodiče.

Limity vyšších harmonických napětí jsou uvedeny v Tabulce 9.4. Opět se jedná o hodnoty, které nesmí přesáhnout průměry získané měřením v desetiminutových intervalech po dobu alespoň jednoho týdne.

Pro popis celkového obsahu vyšších harmonických se používá činitel THD (1) (Total Harmonic Distortion). PPDS uvádí maximální limit THD 8 % pro 2. až 40. harmonickou napětí:

$$THD_{U,2-40} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{n=40} U_i^2}}{U_1} \leq 0,08 \quad [1; V; V], \quad (9.2)$$

kde

- $THD_{U,2-40}$ (1) činitel celkového harmonického zkreslení napětí pro 2. až 40. harmonickou napětí,

- U_i (V) vyšší harmonická napětí,
- U_1 (V) první harmonické napětí.

Liché harmonické				Sudé harmonické	
Ne násobky 3		Násobky 3			
Řád harmonické h	Harmonické napětí (u_h)	Řád harmonické h	Harmonické napětí (u_h)	Řád harmonické h	Harmonické napětí (u_h)
5	5 %	3	3 %	2	1,9 %
7	4 %	9	1,3 %	4	1 %
11	3 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	2,5 %	21	0,5 %		
17	zkoumá se				
19	zkoumá se				
23	zkoumá se				
25	zkoumá se				
POZNÁMKA 1 Hodnoty pro harmonické vyšších řádů než 25 se neuvažují, jelikož jsou obvykle malé, avšak vlivem rezonančních účinků obtížně předvídatelné.					
POZNÁMKA 2 Uvažují se Informativní hodnoty harmonických řádu vyššího než 13.					
POZNÁMKA 3 V některých zemích jsou vždy vhodné omezení pro harmonické.					
a) V závislosti na druhu sítě mohou být hodnoty třetí harmonické podstatně nižší					

Tabulka 9.4: Limity vyšších harmonických napětí dle PPDS PŘ. 3

9.2 Příloha 4 — paralelní provoz výroben

Provozovatelé distribučních soustav Přílohu č. 4 v listopadu 2018 aktualizovali, následující informace se týkají této nově aktualizované přílohy.

Tato příloha je v souladu s Nařízením Evropské komise 2016/631 o požadavcích na výrobní moduly připojené do LDS (lokálních distribučních soustav), ve znění pozdějších předpisů. Aktualizace se týká přípravy na rozšiřování decentralizovaných zdrojů a implementaci smart grid konceptu do distribučních soustav.

Základem informací, požadavků a limitů pro zdroje umístované na hladině NN a konkrétně mikrozdrojů (výkon do 10 kW) je norma ČSN EN 50 438 ed.2 o požadavcích na paralelní připojení mikrogenerátorů s veřejnými distribučními sítěmi

nízkého napětí. Tato norma umožňuje provozovatelům distribučních soustav stanovovat některé požadavky na připojení mikrozdrojů dle jejich uvážení.⁵

Příloha 4 dále implementuje Vyhlášku ERÚ č. 16/2016 Sb. o podmínkách připojení k elektrizační soustavě, ve znění pozdějších předpisů. Tato vyhláška opravňuje provozovatele přenosové a distribučních soustav stanovovat podmínky připojení, posuzovat žádosti o připojení a stanovovat podíly nákladů spojených s připojením.⁶

9.2.1 Mikrozdroje nedodávající do soustavy

Pro mikrozdroje pracující v ostrovním režimu lze uplatnit zjednodušené připojení k distribuční soustavě v souladu s § 16 Vyhlášky ERÚ 16/2016 Sb. Tyto zdroje ale *nesmí* dodávat elektřinu do soustavy, v opačném případě je provozovatel zdroje vystavena pokuta v souladu s aktuálním cenovým rozhodnutím ERÚ.

Podmínkami připojení jsou:

- Naměřená impedance proudové smyčky v připojovacím bodě není větší nebo rovna limitní impedanci: 0,47 Ω pro zdroje do 16 A/fáze a 0,75 Ω pro zdroje do 10 A/fáze. Není-li toto splněno, pak se musí provést studie připojitelnosti.
- návrh řešení zdroje z hlediska odpojení od distribuční soustavy,
- podání žádosti o uzavření smlouvy,
- uzavření smlouvy.

9.2.2 Paralelní provoz se soustavou

Na zdroje dodávající do soustavy jsou kladeny různé požadavky pro zajištění kvality elektrické energie v síti, kterou odběratelům musí provozovatelé zajistit na základě ustanovení v Zákoně 458/2000 Sb. o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů.

⁵ČSN EN 50 438: Požadavky na paralelní připojení mikrogenerátorů s veřejnými distribučními sítěmi nízkého napětí. 2. vyd. Praha : ÚNMZ, 2014.

⁶VYHLÁŠKA č. 16/2016 Sb.: o podmínkách připojení k elektrizační soustavě. In: . ERÚ, 2016, ročník 2016, číslo 16. Dostupné také z: <http://www.eru.cz/documents/10540/463080/Vyhl%C3%A1%C5%A1ka+o+podm%C3%ADnk%C3%A1ch+p%C5%99ipojen%C3%AD%20k+elektriza%C4%8Dn%C3%AD%20soustav%C4%9B/e40a8453-37b6-4b06-848e-c4eac97a886a>

Řízení o připojení zdroje se zahajuje podáním žádosti v souladu s Vyhláškou ERÚ č. 16/2016 Sb. Žadatel zároveň předloží následující údaje:

- katastrální mapa s vyznačeným místem výroby,
- hodnota zkratové odolnosti předávacího bodu,
- podrobný popis ochran,
- příspěvek výroby ke zkratovému proudu,
- pro střídače a synchronní generátory buzením pomocí usměrňovačů navíc proudy vyšších harmonických a impedance pro frekvence HDO,
- pro větrné elektrárny se musí navíc uvádět protokol o očekávaných zpětných vlivech (jmenovitý výkon, činitel flickeru, meze řízení účinníku atd.).

Dále podá vyplněný dotazník, který obsahuje údaje provozovatele, zřizovatele, parametry zařízení apod. Je-li to nutné, provozovatel distribuční soustavy informuje žadatele o nutnosti vypracovat studii připojitelnosti.

U zdrojů do 30 kW připojovaných do soustavy NN se studie připojitelnosti běžně nevyžaduje a provozovatel distribuční soustavy posuzuje žádost na základě výše uvedených údajů a dokumentů.

Zdroje se dělí do šesti kategorií (A1, A2, B1, B2, C a D) v závislosti na instalovaném výkonu. S rostoucím výkonem zdroje (změnou kategorie) se zpřísňují a rozšiřují na něj kladené požadavky.

Nejrozšířenější zdroje na hladině NN spadají do kategorií výroben A1 (výkon od 800 W vč. do 11 kW)⁷, méně častěji do A2 (výkon od 11 kW vč. do 100 kW) a vyjímečně do B1 (od 100 kW vč. do 1 MW).

9.2.3 Flicker

Flicker (též flickr) je malé periodické kolísání napětí. Provoz elektrický zařízení nijak negativně neovlivňuje. Ovlivňuje především klasické vláknové žárovky, protože jejich zářivý tok je úměrný třetí až čtvrté mocnině napětí.

Flicker popisujeme pomocí krátkodobé a dlouhodobé míry vjemu flickeru. Dlouhodobá míra vjemu flickeru P_{ft} (1) je definována jako průměr měření v intervalech deseti minut po dobu dvou hodin. Pro připojené zdroje energie musí platit, že flicker jimi způsobovaný musí být menší nebo roven 0,46.

⁷Výrobní do výkonu 800 W do kategorie žádné kategorie přímo nespádají, nicméně jsou na ně kladené požadavky jako na výrobní z kategorie A1.

Zavedeme-li činitel flickeru c_{flicker} (1), pak lze dlouhodobou míru flickeru způsobovanou výrobnou definovat pomocí rovnice (9.3).

$$P_{\text{lt}} = c_{\text{flicker}} \cdot \frac{S_{\text{nE}}}{S_{\text{kV}}} \quad [1; 1; \text{VA}; \text{VA}], \quad (9.3)$$

kde:

- S_{nE} (VA) je jmenovitý zdánlivý výkon zdroje,
- S_{kV} (VA) je zkratový výkon v daném bodě soustavy.

Činitel flickeru c_{flicker} (1) je závislý na charakteru zdroje. Větších hodnot nabývá pro rotující zdroje s klesající tendencí s rostoucí velikostí rotující hmoty či počtem válců pístových motorů⁸. Pro fotovoltaická zařízení nejsou hodnoty známy, ale předpokládají se velmi malé.

9.2.4 Dovolené zvýšení napětí

Maximální dovolené zvýšení napětí v důsledku připojení zdroje do sítě NN je $\Delta u_{\text{nn,max}} = 3 \%$. Stejná hodnota platí také pro přechodnou změnu napětí při připínání zdroje.

Pokud bychom uvažovali jeden nebo i více zdrojů připojených ovšem do jednoho příjného bodu, pak lze hodnotit zvýšení napětí pomocí činitele k_{k1nn} (1):

$$k_{\text{k1nn}} = \frac{S_{\text{kV}}}{\sum S_{\text{Amax}}} \quad [1; \text{VA}; \text{VA}], \quad (9.4)$$

kde

- S_{kV} (VA) je zkratový výkon v příjném bodě,
- $\sum S_{\text{Amax}}$ (VA) je celkový maximální zdánlivý výkon připojených zdrojů.

Pro dodržení podmínky nepřekročení dovoleného nárůstu napětí v příjném bodě musí v sítích NN platit: $k_{\text{k1nn}} \leq 33$.

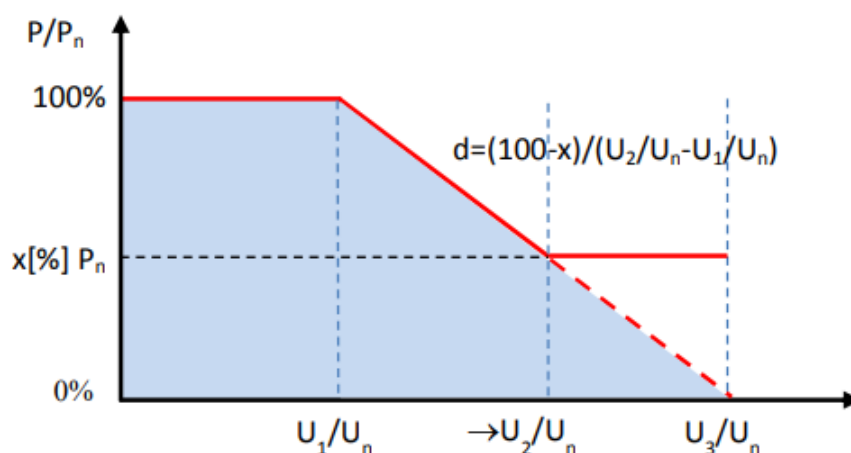
V častějším případě, ve kterém se na hladině NN vyskytuje více příjných míst, je nutné analyzovat změny napětí podrobněji s ohledem na celou soustavu, ve které jsou zdroje připojeny. Nejméně příznivý případ pak musí splňovat podmínku nárůstu napětí $\Delta u_{\text{nn}} \leq 3 \%$.

⁸Například soustorojí velkých elektráren dosahují hodnoty c maximálně 20, což je hodnoceno jako pro flicker nekritická hodnota.

9.2.5 Funkce $P(U)$

Provozovatelé distribučních soustav předpokládají vybavení všech zdrojů do 16 A/fáze (včetně) připojených pomocí střídače a všech zdrojů nad 16 A/fáze generátory umožňujícími řízení činného výkonu napětím. Důvodem těchto opatření je zabránění automatickému odpojování zdrojů napětovými ochranami.

Na Obrázku 9.5 je znázorněn trend funkce řízení činného výkonu napětím. Konkrétní průběh řídicí funkce se stanoví podle požadavků distributora nebo studie připojitelnosti. Na svislé ose je znázorněn poměr dodávaného činného výkonu zdroje k jeho jmenovitému činnému výkonu, na vodorovné poměr napětí v přípojném bodě k jmenovitému napětí pro tento bod.



Obrázek 9.5: Charakteristický průběh $P(U)$ funkce⁹

9.2.6 Funkce $Q(U)$

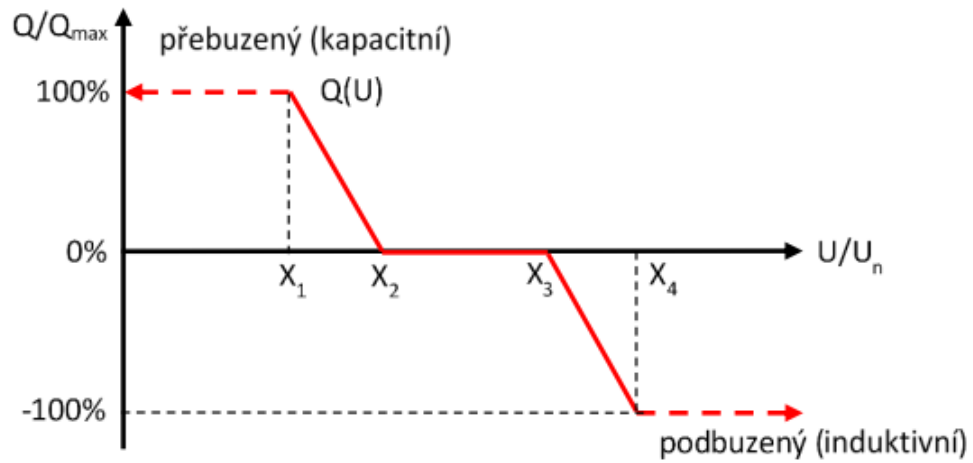
Dle ČSN EN 50438 ed. 2 zdroje 16 A/fáze musí udržovat hodnotu účinníku mezi 0,90 induktivní a 0,90 kapacitní za předpokladu, že činná složka výkonu je nad 10 % jmenovitého výkonu zdroje. Stejně požadavky platí i pro zdroje vyšších výkonů.¹⁰

Na Obrázku 9.6 je znázorněn trend funkce řízení jalového výkonu napětím. Na svislé ose se nachází poměr dodávaného jalového výkonu zdroje k jeho jmenovitému jalovému výkonu, na vodorovné poměr napětí v přípojném bodě k jmenovitému napětí. Parametry řídicí funkce se opět nastaví na základě požadavků

⁹PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUTUČNÍCH SOUSTAV: PŘÍLOHA 4 PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ VÝROBEN A AKUMULAČNÍCH ZAŘÍZENÍ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DISTRIBUTUČNÍ SOUSTAVY [online]. 2018 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2018_priloha-4.pdf

¹⁰ČSN EN 50 438: Požadavky na paralelní připojení mikrogenerátorů s veřejnými distribučními sítěmi nízkého napětí. 2. vyd. Praha : ÚNMZ, 2014.

distributora či studie připojitelnosti.



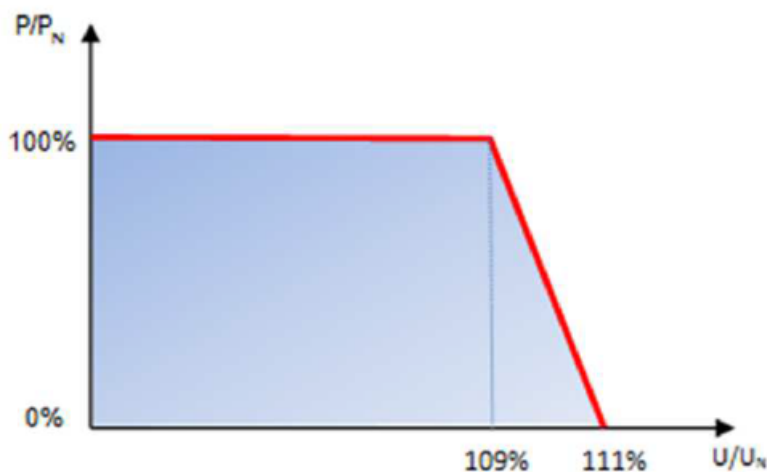
Obrázek 9.6: Charakteristický průběh $Q(U)$ funkce¹³

Při integraci $P(U)$ a $Q(U)$ regulátorů řídicích velké množství blízkých zdrojů bude muset docházet k jejich vzájemné koordinaci.

9.3 Projekt InterFlex

InterFlex je evropský projekt zkoumající možnosti zvýšení připojitelnosti decentralizovaných zdrojů a integraci dobíjecích stanic pro elektromobily do distribučních soustav. Tohoto projektu se účastní provozovatelé distribučních soustav a další subjekty ze šesti zemí Evropy.^{11, 12}

V rámci tohoto projektu provedla společnost ČEZ Solární, a.s., studii, ve které integrovala $P(U)$ a $Q(U)$ regulátory do sítí nízkého napětí obcí Divišov v okrese Benešov a Těptín v okrese Praha-Východ. Z výsledků vyplývá, že připojitelný výkon těmito zásahy je možné zvýšit až o 40 %. Na Obrázku 9.7 a Obrázku 9.8 jsou znázorněny parametry použitých regulačních funkcí.¹⁴



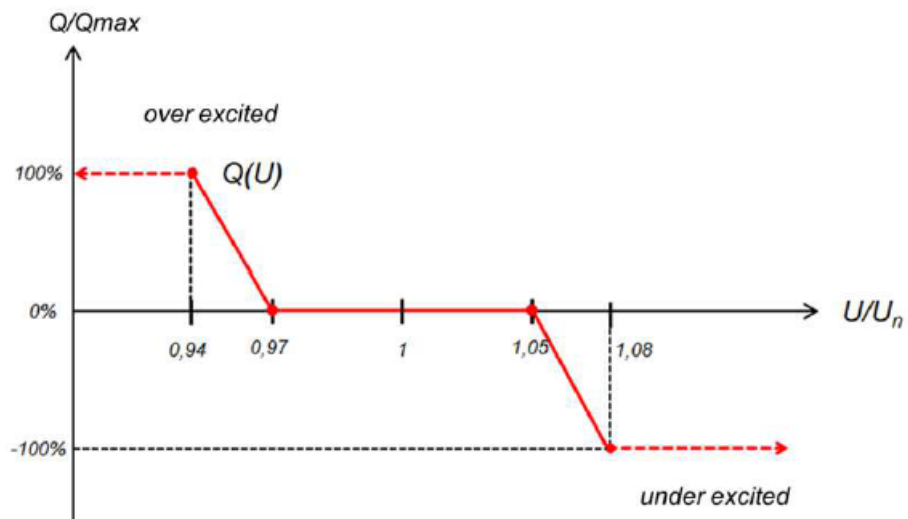
Obrázek 9.7: $P(U)$ funkce — studie InterFlex Design of solution V1.0: Deliverable D6.1¹⁵

¹¹Projekt InterFLEX. ČEZ Distribuce, a.s. [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/projekt-interflex.html>

¹²InterFLEX. InterFLEX [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://interflex-h2020.com/>

¹³PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV: PŘÍLOHA 4 PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ VÝROBEN A AKUMULAČNÍCH ZAŘÍZENÍ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY [online]. 2018 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2018_priloha-4.pdf

¹⁴Design of solution V1.0: Deliverable D6.1 [online]. 2017 [cit. 2019-04-4]. Dostupné z: <https://interflex-h2020.com/wp-content/uploads/2018/06/D6.1-Design-of-solutions.pdf>



Obrázek 9.8: $Q(U)$ funkce — studie InterFlex Design of solution V1.0: Deliverable D6.1¹⁵

¹⁵Design of solution V1.0: Deliverable D6.1 [online]. 2017 [cit. 2019-04-4]. Dostupné z: <https://interflex-h2020.com/wp-content/uploads/2018/06/D6.1-Design-of-solutions.pdf>

10. Modelování vlivu zdrojů

10.1 Program DNCalc

Výpočty provádíme pomocí programu DNCalc ve verzi 1.3, vytvořeném společností EnerGoConsult České Budějovice s.r.o., který poskytla Katedra elektroenergetiky elektrotechnické fakulty Českého vysokého učení v Praze. Velkou výhodou tohoto programu v porovnání s jinými (například program E-Vlivy také od společnosti EnerGoConsult České Budějovice s.r.o.) je možnost třífázových výpočtů a tedy sledování nesymetrie.

Dle informací od společnosti EnerGoConsult České Budějovice s.r.o. program DNCalc používá k výpočtům ustálených stavů třívodičových sítí vlastní modifikaci numerické metody Implicit Z-Bus. Pro výpočet zkratových poměrů jsou v programu integrovány metody souměrných složek a metoda ekvivalentního zdroje.

10.1.1 Omezení

Tato školní verze umožňuje výpočty modelů obsahujících maximálně 50 prvků (zdroje, odběry, vedení), proto modely rozdělíme na odpovídající části (vývody DTS) a každou budeme posuzovat zvlášť. Abychom respektovali ostatní vývody a úbytky napětí jimi způsobované na impedanci transformátoru, zapojíme na sekundární stranu transformátoru navíc odběry a zdroje o výkonech odpovídajících součtům výkonů ve zbylé části sítě. Toto provedeme pro všechny vývody a získáme tak počet verzí odpovídající počtu vývodů. Jelikož požadavky na instalace zdrojů reálně nemusí respektovat stav sítě, za výsledný připojitelný výkon budeme považovat nejmenší připojitelný výkon ze všech verzí daného scénáře.

Napětovou a proudovou nesymetrii můžeme vzhledem k tomuto omezení sledovat pouze podél vývodu.

Školní verze neumožňuje nastavení parametrů regulačních $Q(U)$ a $P(U)$ charakteristik (plná verze ano). Tuto situaci se pokusíme vyřešit nastavením provozního účinníku zdrojů na hodnotu $\cos \varphi_{\text{prov}}^z = -0,9$. Tato hodnota odpovídá mezní hodnotě regulace dle PPDS Příloha 4, respektive ČSN EN 50438 ed. 2. Záporným účinníkem zdrojů program DNCalc rozumí odběr jalového výkonu.

$P(U)$ regulaci neuvažujeme, neboť cílem této práce je stanovit maximální připojitelný činný výkon zdrojů.

10.2 Parametry modelů

O modely jsme požádali společnost ČEZ Distribuce, a.s., abychom modelovali co nejvíce reálné sítě z hlediska používaných vedení a transformátorů v oblastech domovní zástavy. V Příloze Nadzemní síť a Příloze Kabelová síť jsou mimo části výsledků uvedeny i parametry modelů — velikosti zátěží, délky vedení či elektrické vlastnosti vodičů. Zde ještě doplníme, že provozní kapacitu vedení zanedbáváme, $C_{\text{prov}} = 0 \text{ } \mu\text{Fkm}^{-1}$ pro všechna vedení. Kabely používané na hladině NN mají obecně velmi nízkou kapacitu maximálně v řádu pár stovek nFkm^{-1} ¹ a vzhledem k tomu je některé katalogy některých výrobců dokonce ani neuvádí.

Uzemnění vodiče PEN uvažujeme pouze v místě uzlu transformátoru.

Modelujeme případ poměrně nízkého zatížení soustavy z hlediska odběrů. Takové situace reálně nastávají. V odpoledních hodinách nastávají v soustavách nízkého napětí v obytných oblastech minima hodnot odebíraného výkonu (lidé jsou v zaměstnání apod.). Instalované fotovoltaické zdroje v této denní době ale dosahují maximálních hodnot generovaných výkonů.

10.2.1 Odběry

Jednotlivé vývody DTS obsahují různé počty odběrů. Do každého uzlu vývodu je zapojen jeden jednofázový a jeden třífázový odběr o stejném výkonu. Provozní účinník všech odběrů je $\cos \varphi_{\text{prov}}^{\circ} = 0,95$ induktivní. Výkon odběrů je neměnný pro všechny modelované scénáře.

Všechny jednofázové odběry jsme se rozhodli zapojit do jedné fáze (fáze B). Jedná se sice o nepravděpodobnou situaci, nicméně nám toto uspořádání pomůže sledovat nesymetrické zatížení, které se v soustavách NN běžně vyskytuje.

10.2.2 Zdroje

Při výpočtech budeme uvažovat pouze fotovoltaické zdroje. Větrné zdroje uvažovat nebudeme vzhledem k dobám využití v domovní zástavbě. Vodní zdroje jsou na hladině NN velmi vzácné. NAP SG předpokládá nárůst instalovaného výkonu mikrokogeneračních zdrojů, nicméně veřejně neuvádí předpoklady studií ani nezduvodňuje svá tvrzení. Mikrokogenerace se pro některé rodinné domy zatím jeví jako ekonomicky neefektivní, proto ji nebudeme uvažovat².

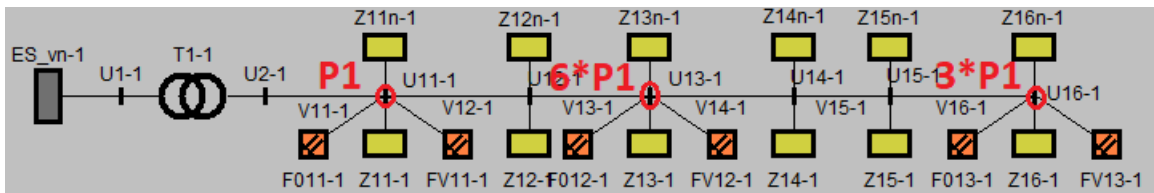
¹Draka: Silové kabely a vodiče, bezhalogenové kabely se zvýšenou odolností proti šíření plamene, bezhalogenové ohniodolné kabely, výtahové kabely [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: https://www.kvelektro.cz/wp-content/uploads/2015/11/silove_kabely_a_vodice.pdf

²JANDUS, Tadeáš. APLIKACE KOGENERAČNÍ JEDNOTKY V RD [online]. 2017 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68517/F3-BP-2017-Jandus-Tadeas-jandus.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.

Každý vývod DTS obsahuje 6 fotovoltaických zdrojů: 3 jednofázové a 3 třífázové. Do jednoho uzlu je vždy zapojen právě jeden z těchto dvou typů. Jelikož PDS nekoordinují připojování jednofázových zdrojů, tak se opět zaměříme na extrémní případ a v celé zkoumané síti zapojíme zdroje do jedné fáze (fáze A).

Rozdělení výkonů

Nechť má jednofázový zdroj v prvním uzlu výkon P_1 , pak jednofázový zdroj v dalším uzlu má výkon $6 \cdot P_1$ a poslední jednofázový zdroj výkon $3 \cdot P_1$. Obdobně pro třífázové zdroje, viz Obrázek 10.1. Toto rozdělení bylo doporučeno společností ČEZ Distribuce, a.s., s poznámkou, že takové rozložení uvažuje NAP SG³.



Obrázek 10.1: Rozdělení výkonů zdrojů podél vývodu

Rozdělení výkonů v poměru 1:6:3 je dodržováno při všech scénářích. V tabulkách budeme pro toto rozdělení používat pojem *výkonová kategorie* (1, 6, 3).

Provozní účinník

Všechny zdroje, pokud nezkoumáme případ s regulací $Q(U)$, pracují s provozním účinníkem zdrojů $\cos \varphi_{\text{prov}}^z = 1$. V případě, že zkoumáme vliv regulace $Q(U)$, pak je provozní účinník je nastaven na hodnotu $\cos \varphi_{\text{prov}}^z = -0,9$, a to u všech zdrojů.

10.3 Hodnocení připojitelnosti

Připojitelnost posuzujeme pouze podle napěťové změny vyvolané připojením všech zdrojů, kritériem je tedy $\Delta u_{\text{NN}, \text{max}} = 3 \%$ v nějakém uzlu. Výpočty provádíme s přesností na 0,01 %. Další sledované veličiny jsou proudová zatížitelnost napájecího transformátoru, případně vedení, napěťová nesymetrie a napětí v uzlech.

Flicker, THD ani vliv na signál HDO zkoumat nebudeme. Tyto vlivy jsou dány konstrukcí zařízení (generátory, měniče) a lze je vhodným uspořádáním silně snížit. Fotovoltaické zdroje mají nastavený nulový proud všech harmonických složek měniče.

³V oficiálním dokumentu toto není uvedeno, protože metodika výpočtů nebyla zveřejněna.

10.3.1 Scénáře

Při hledání maximálního připojitelného výkonu začínáme na tradičním uspořádání sítě z hlediska vodičů — se zmenšujícím se průřezem podél vývodu směrem od transformátoru, které je dále označováno jako *původní*. Následně zkoumáme toto uspořádání se zavedením $Q(U)$ regulace měničů. Další limity určujeme pro vyměněné vedení za 1-AES 4×120 (nadzemní síť) a 1-AYKY $3 \times 240 + 120$ (kabelová síť), a to jednak bez $Q(U)$ regulace a následně i s touto regulací. Kabelové části nadzemní sítě neměníme v žádném modelovaném případě.

Scénáře budeme v následujících kapitolách označovat následovně:

- Původní (nadzemní, kabelové)
- Původní (nadzemní, kabelové) + $Q(U)$
- AES120
- AES120 + $Q(U)$
- AYKY240
- AYKY240 + $Q(U)$.

Transformátory mají nastavenou druhou odbočku a velikost na sekundární straně nezatíženého distribučního transformátoru je $U_{n2} = 230$ V. Velikost tohoto napětí nicméně neovlivní velikost maximálního připojitelného výkonu z hlediska napěťových změn vyvolaných připojením zdrojů, což je pro nás klíčový faktor.

Ovšem i tak z výsledků modelování vyplývá, že v žádném modelovaném případě nebyly překročeny meze a všechny scénáře vyhověly požadavkům PPDS Příloha 3 na minimální dovolenou velikost napětí $0,9 \cdot U_n$, tedy 207 V fázových. Obdobně v žádném případě nebyla překročena horní mez $1,1 \cdot U_n$, tedy 253 V fázových.

11. Nadzemní síť

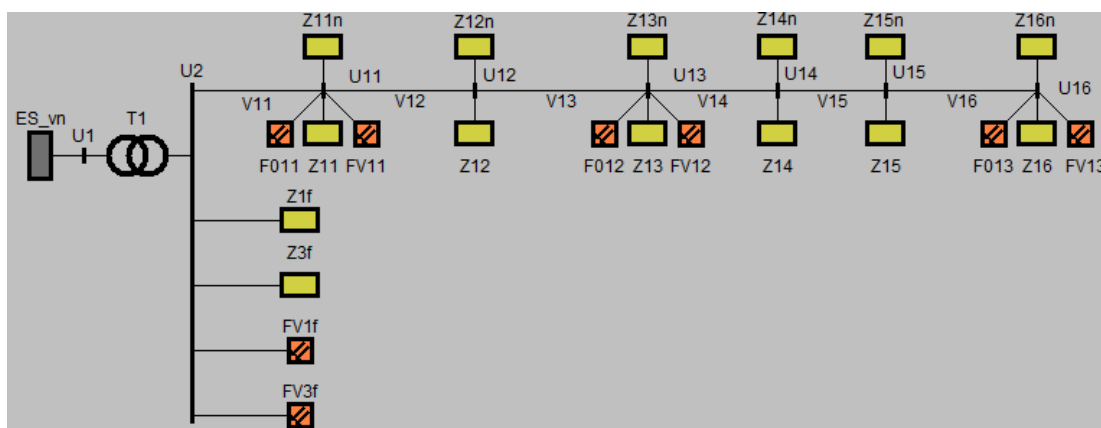
11.1 Popis modelu

Na Obrázku 11.1 je znázorněna modelová síť s nadzemním vedením. Jedná se o jednostranně napájenou síť s 52 odběry a 24 rozptýlenými fotovoltaickými zdroji. Z distribuční trafostanice jsou vedeny čtyři vývody, tři jsou připojené kabelovým vedením. V Příloze Nadzemní síť jsou uvedeny parametry ekvivalentu soustavy VN (ES_vn), distribučního transformátoru (T1), odběrů (Z) a délky vedení (V) a jejich elektrické parametry.

Na Obrázku 11.2 je znázorněno zjednodušené schéma pro školní verzi programu DNCalc. Na tomto uspořádání jsme pro jednotlivé vývody a scénáře analyzovali připojitelnost zdrojů.



Obrázek 11.1: Modelová nadzemní síť



Obrázek 11.2: Ukázka zapojení zjednodušeného venkovního modelu pro analýzu

11.2 Výsledky

11.2.1 Maximální připojitelné výkony

Verze zapojení, které odpovídají našemu kritériu, tedy nejmenší hodnotě z dosažených maxim, jsou uvedeny v Tabulce 11.1.

Vyhovující verze — nadzemní síť	
Scénář	Vývod (verze)
Původní	V1
Původní + $Q(U)$	V1
AES120	V4
AES120 + $Q(U)$	V4

Tabulka 11.1: Vyhovující verze — nadzemní síť

V následujících tabulkách jsou uvedeny maximální připojitelné výkony a jejich porovnání z hlediska modelovaných scénářů.

Max. příp. výkony — nadzemní síť	
Scénář	P (kW)
Původní	35,4
Původní + $Q(U)$	56,4
AES120	62,1
AES120 + $Q(U)$	112,4

Tabulka 11.2: Maximální připojitelné výkony

V Tabulce 11.3 jsou pak uvedeny nárůsty připojitelného výkonu Δp (%) oproti scénáři Původní. V Tabulce 11.4 pak nárůsty výkonu způsobené integrací $Q(U)$ regulace.

Nárůsty max. příp. výkonu oproti <i>Původní</i> — nadzemní síť	
Scénář	Δp (%)
Původní + Q(U)	59,3
AES120	75,4
AES120 + Q(U)	217,5

Tabulka 11.3: Nárůsty připojitelného výkonu oproti scénáři *Původní*

Nárůsty max. příp. výkonu zavedením Q(U) — nadzemní síť	
Do scénáře	Δp (%)
Původní	59,3
AES120	81,0

Tabulka 11.4: Nárůst výkonu při zavedení Q(U) regulace oproti stavu bez této regulace

V Příloze Nadzemní síť jsou podrobně uvedeny výkony jednotlivých zdrojů.

11.2.2 Míry napěťové nesymetrie

V Tabulce 11.5 můžeme pozorovat maximální míry napěťové nesymetrie, které se vyskytují na koncích vývodů. V Tabulce 11.6 jsou uvedeny hodnoty činitele napěťové nesymetrie ρ_U (%) v uzlu U2. V Příloze Nadzemní síť jsou uvedeny míry napěťové nesymetrie ve všech uzlech. Můžeme zde pozorovat, že napěťová nesymetrie od konce vývodu směrem k uzlu U2 klesá. To je způsobeno tím, že dochází postupně k určité symetrizaci vlivem připojených zdrojů i odběrů.

Nejvyšší míra nap. nes. na vývodu — poslední uzel — nadzemní síť	
Scénář	ρ_U (%)
Původní	0,434
Původní + Q(U)	0,490
AES120	0,402
AES120 + Q(U)	0,541

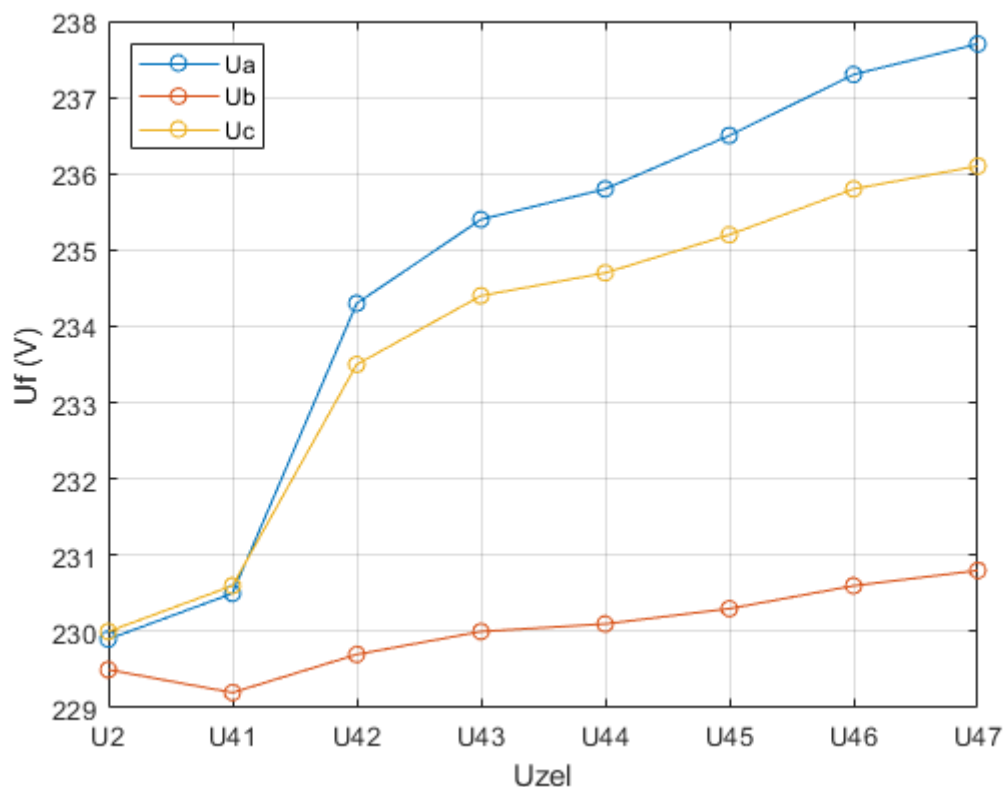
Tabulka 11.5: Nejvyšší míra napěťové nesymetrie na vývodu — poslední uzel

Míra nap. nes. v uzlu U2 — nadzemní síť	
Scénář	ρ_U (%)
Původní	0,204
Původní + $Q(U)$	0,197
AES120	0,247
AES120 + $Q(U)$	0,308

Tabulka 11.6: Míra napěťové nesymetrie v uzlu U2

11.2.3 Napěťový profil vývodu

V Příloze Nadzemní síť jsou uvedeny hodnoty fázových napětí v uzlech pro všechny modelované scénáře v tabulkách i graficky. Na Obrázku 11.3 jsou znázorněna fázová napětí podél vývodu ve scénáři AES + $Q(U)$. Jak lze očekávat, nejmenších hodnot napětí dosahuje fáze B, ve které jsou zapojeny pouze jednofázové odběry. Napětí fáze B ale i tak roste díky třífázovým zdrojům o vyšším dodávaném výkonu než je odběr. Nejvyšších napětí dosahuje pak fáze A v důsledku připojených jednofázových zdrojů a samozřejmě také díky příspěvkům od zdrojů třífázových.

Obrázek 11.3: Scénář AES120 + $Q(U)$ — napětí podél vývodu

11.2.4 Proudové poměry

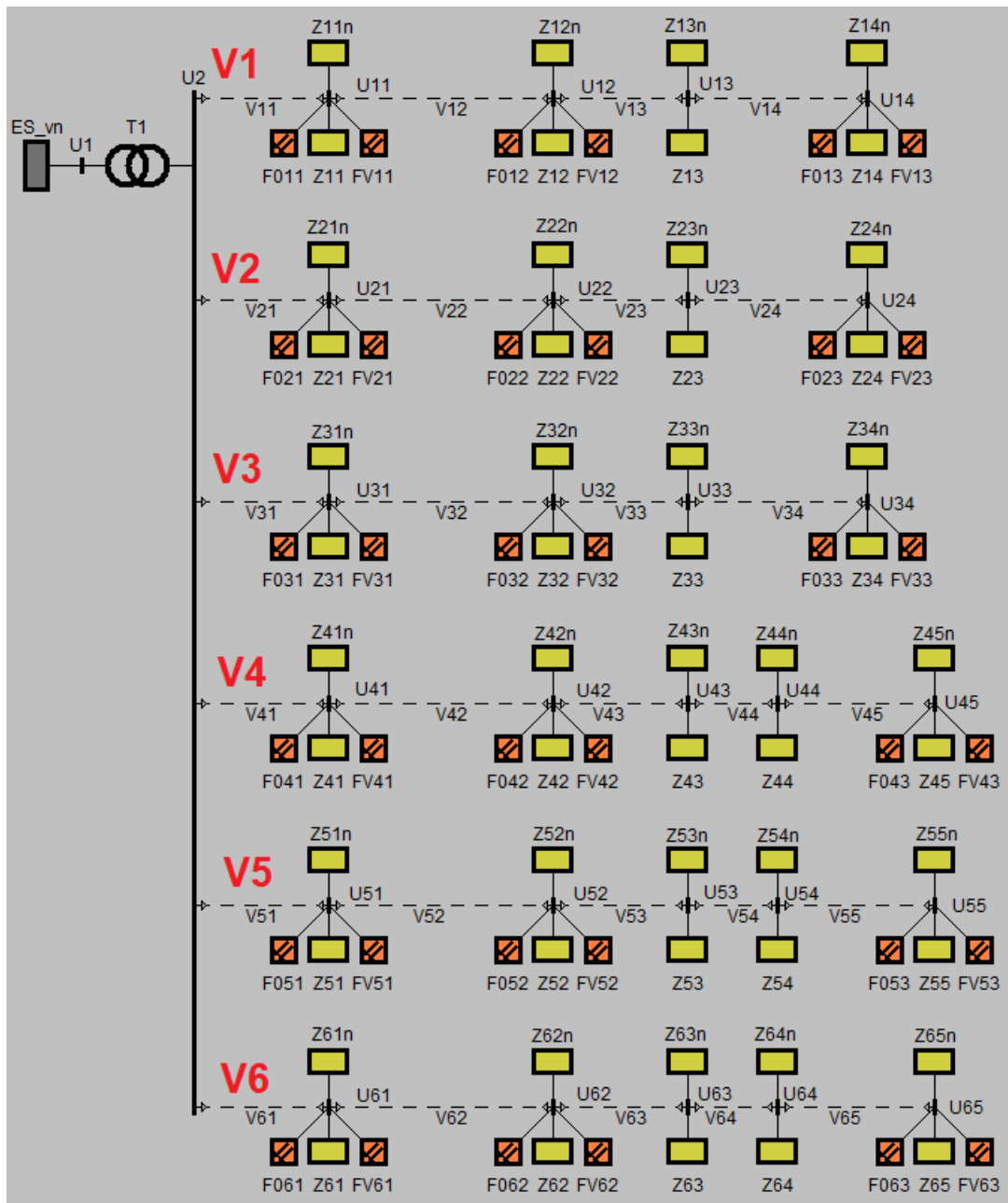
V žádném z modelovaných případů nedošlo k překročení proudových limitů vodičů ani napájecího transformátoru.

Pomocí vztahu (8.29) a hodnot velikostí fázových proudů a úhlů fázorů proudu, které jsme získali z modelování v programu DNCalc, jsme určili velikosti fázoru vyrovnávacího proudu vodičem PEN I_{PEN} (A) v jednotlivých úsecích vývodu a do uzlu transformátoru. Tabulky s těmito hodnotami, hodnotami fázových proudů transformátoru a výkony transformátoru jsou uvedeny v Příloze Nadzemní.

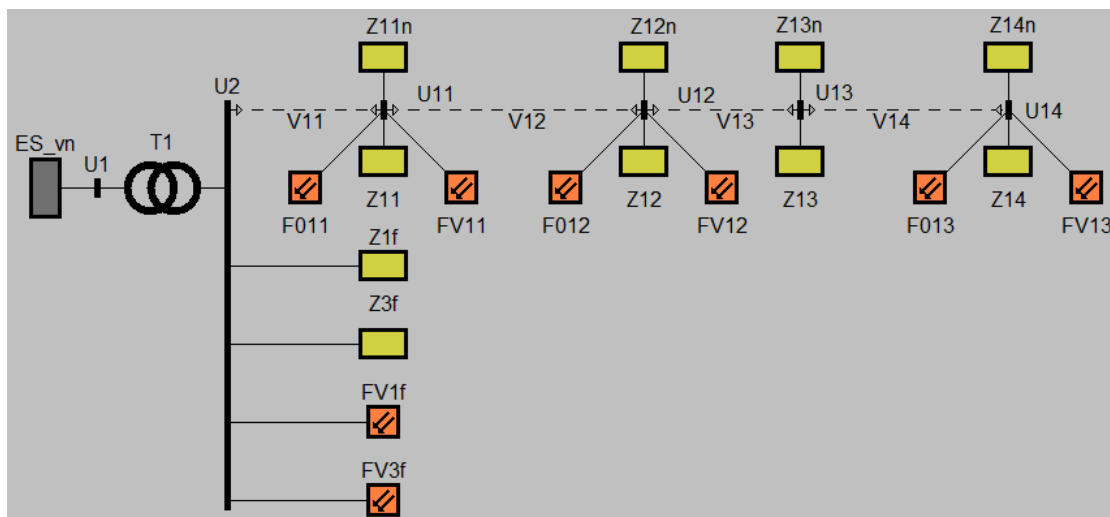
12. Kabelová síť

12.1 Popis modelu

Na Obrázku 12.1 je znázorněna modelová kabelová síť. Jedná se o jednostranně napájenou síť s 54 odběry a 36 rozptýlenými fotovoltaickými zdroji na šesti vývodech DTS. V Příloze Kabelová síť jsou uvedeny parametry ekvivalentu soustavy VN (ES_vn), distribučního transformátoru (T1), odběrů (Z) a délky vedení (V) a jejich elektrické parametry.



Obrázek 12.1: Modelová kabelová síť



Obrázek 12.2: Ukázka zapojení zjednodušeného kabelového modelu

Na Obrázku 12.2 je znázorněno zjednodušené schéma pro školní verzi programu DNCalc. Na tomto uspořádání jsme pro jednotlivé vývody a scénáře analyzovali připojitelnost zdrojů.

12.2 Výsledky

12.2.1 Maximální připojitelné výkony

Verze zapojení, které odpovídají našemu kritériu, tedy nejmenší hodnotě z dosažených maxim, jsou uvedeny v Tabulce 12.1. Vzhledem k uspořádání sítě je několik verzí rovnocenných. V dalších částech budeme pro zjednodušení uvažovat jen vývod (verzi) V4.

Vyhovující verze — kabelová síť	
Scénář	Vývod (verze)
Původní	V4, V5, V6
AYKY240	V4, V5, V6

Tabulka 12.1: Vyhovující verze — kabelová síť

V Tabulce 12.2 jsou uvedeny maximální připojitelné výkony pro modelované scénáře. Hvězdička (*) označuje scénáře, v nichž připojitelný výkon odpovídá vyššímu proudu než je jmenovitý proud vinutí distribučního transformátoru.

K překročení jmenovitého proudu fáze A transformátoru dochází v obou scénářích s $Q(U)$ regulací. Připojitelnost zdrojů z hlediska napěťových změn není limitována.

Vysoký připojitelný výkon byl u krátkých kabelových vývodů očekávatelný vzhledem k jejich poměrně malé celkové rezistanci a reaktanci v porovnání s nad-

zemním vedením.

Výměna původního vedení se zmenšujícím se průřezem za kabely 1-AYKY 3×240+120 způsobila nárůst připojitelného výkonu o 60,9 % z hodnoty 195,6 kW na 314,8 kW.

Maximální připojitelné výkony — kabelová síť	
Scénář	P (kW)
Původní	195,6
Původní + $Q(U)$	*
AYKY240	314,8
AYKY240 + $Q(U)$	*

Tabulka 12.2: Maximální připojitelné výkony — kabelová síť

V Příloze Kabelová síť jsou podrobně uvedeny výkony jednotlivých zdrojů.

12.2.2 Míry napěťové nesymetrie

V Tabulce 12.3 můžeme pozorovat maximální míry napěťové nesymetrie, které se vyskytují na koncích vývodů. V Tabulce 12.4 jsou uvedeny hodnoty činitele napěťové nesymetrie ρ_U (%) v uzlu U2. Opět dochází k poklesu nesymetrie ve směru od konce vedení k uzlu U2 vlivem symetrizace způsobované odběry a zdroji. V Příloze Kabelová síť jsou uvedeny míry napěťové nesymetrie ve všech uzlech.

Míry napěťové nesymetrie se pohybují v limitech danými PPDS Příloha 3 (do 2 %) a nejsou v našem případě limitujícím faktorem.

Nejvyšší míra nap. nes. na vývodu — kabelová síť	
Scénář	ρ_U (%)
Původní	0,526
AYKY240	0,594

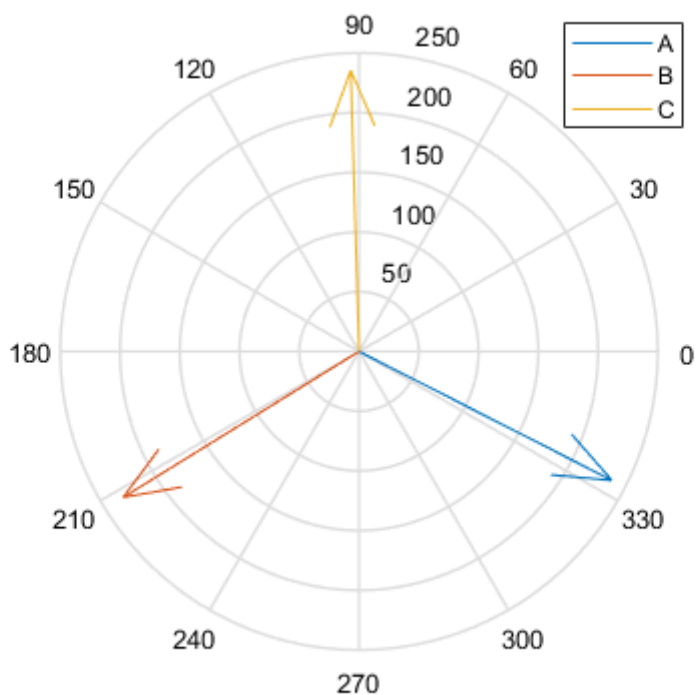
Tabulka 12.3: Nejvyšší míra nap. nesymetrie na vývodu

Míra nap. nes. v uzlu U2 — kabelová síť	
Scénář	ρ_U (%)
Původní	0,384
AYKY240	0,484

Tabulka 12.4: Míra napěťové nesymetrie v uzlu U2

Na Obrázku 12.3 jsou znázorněny fázory napětí v posledním uzlu vývodu scénáře AYKY240. Záměrně uvádíme fázorový diagram až v této kapitole, protože

ve scénáři AYKY240 je v posledním uzlu napěťová nesymetrie v grafickém podání nejvíce znatelná. Úhlové odchylky od ideální hvězdy napětí a odchylky velikostí od jmenovité hodnoty napětí $U_n = 230$ V jsou uvedeny v Tabulce 12.5.



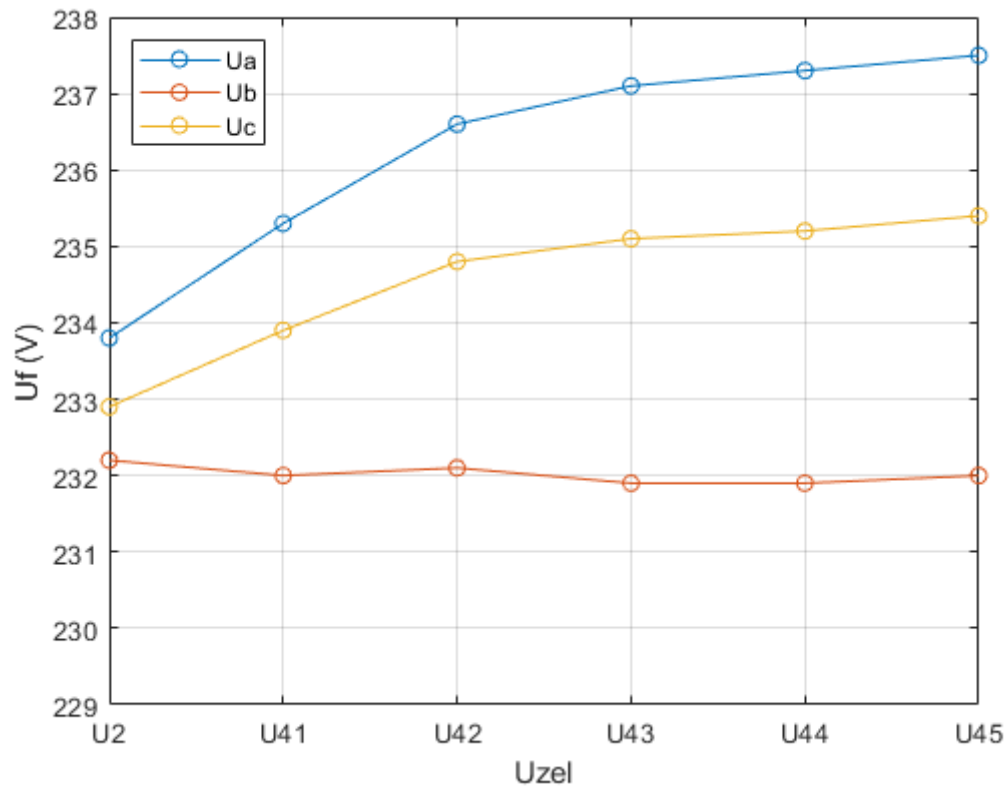
Obrázek 12.3: Scénář AYKY240 — fázory napětí v uzlu U45

Odchyly fázorů nap. od ideálních — kabelová síť		
Fáze	Úhlová odchylka (°)	Odchylka velikosti od U_n (V)
A	+2,27	+7,52
B	+1,40	+1,97
C	+1,80	+5,36

Tabulka 12.5: Scénář AYKY240 — odchylky fázorů napětí v uzlu U45 od ideální hvězdy napětí

12.2.3 Napěťový profil vývodu

Obdobně jako u nadzemní sítě dochází v důsledku uspořádání modelu k nejvyššímu napětí na fázi A a nejmenším napětí v uzlech dosahuje fáze B. Na Obrázku 12.4 jsou znázorněny průběhy fázových napětí podél vývodu ve scénáři AYKY240.



Obrázek 12.4: Scénář *AYKY240* — napětí podél vývodu

12.2.4 Proudové poměry

Jak bylo řečeno, k překročení proudových limitů transformátoru (i vedení) došlo v případech se zavedenou $Q(U)$ regulací.

Pomocí vztahu (8.29) a hodnot velikostí fázových proudů a úhlů fázorů proudu, které jsme získali z modelování v programu DNCalc, jsme určili velikost fázoru proudu I_{PEN} (A) stejně jako v případě nadzemní sítě. Tabulky s těmito hodnotami, hodnotami fázových proudů transformátoru a výkonů transformátoru jsou uvedeny v Příloze Kabelová.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo analyzovat vlivy decentralizovaných zdrojů na provozní parametry distribučních soustav nízkého napětí a vyhodnotit možná opatření pro zvýšení připojitelného výkonu.

Výpočty, které jsme v této diplomové práci prováděli, provádí distribuční společnosti, aby modelovaly vlivy rozšiřujících se decentralizovaných zdrojů v soustavách nízkého napětí a mohly tak činit kroky směřující k bezpečnému provozu elektrizační soustavy.

Byly analyzovány modelová síť nadzemního a modelová síť kabelového vedení s předpokládaným umístěním v čistě domovní zástavbě. Kritériem připojitelnosti bylo maximální dovolené zvýšení napětí v nějakém z uzlů sítě. Velikost maximálního dovoleného zvýšení napětí způsobeného připojením zdrojů stanovují Pravidla provozu distribučních soustav a tato hodnota činí pro hladinu nízkého napětí $\Delta u_{\text{nn, max}} = 3 \%$.

Dále jsme sledovali hodnotu činitele napěťové nesymetrie, pro který Pravidla provozu distribučních soustav stanovují limit $\rho_U = 2 \%$.

Opatření, která jsme prováděli, byly výměny vedení a zavádění regulace jaloového výkonu zdrojů napětím ($Q(U)$ regulace).

Nadzemní síť

Modelová nadzemní síť byla složena z celkem 52 odběrů a 24 fotovoltaických zdrojů. Polovina z těchto zařízení byla jednofázová, druhá polovina třífázová. Odběry pracovaly s účínkem $\cos \varphi = 0,95$.

Připojitelný činný výkon do nadzemní sítě se zmenšujícím se průřezem vodičů ve směru od napájecího transformátoru činil 35,4 kW. Do této sítě jsme následně zavedli $Q(U)$ regulaci, čímž se připojitelný výkon zvýšil o 59,3 % na hodnotu 56,4 kW oproti stavu bez této regulace.

V dalším kroku jsme provedli výměnu vedení se zmenšujícím se průřezem ve směru od napájecího transformátoru za vedení složené z vodičů typu 1-AES120 s konstantním průřezem 120 mm² podél celého vývodu. Touto výměnou jsme dosáhli připojitelného výkonu zdrojů 62,1 kW, a tedy navýšení o 75,4 % oproti původnímu stavu se zmenšujícím se průřezem vodičů. Navýšení připojitelného výkonu oproti uspořádání soustavy s vedením se snižujícím se průřezem a zavedenou $Q(U)$ regulací činilo pouze 10,1 %.

Kabelová síť

Modelová kabelová síť obsahovala 54 odběrů a 36 fotovoltaických zdrojů, opět jednofázových i třífázových, v poměru jedna ku jedné. Provozní účinník odběrů činil $\cos \varphi = 0,95$.

Maximální připojitelný činný výkon zdrojů v kabelové síti s vedením s postupně se zmenšujícím průřezem od transformátoru dosahoval 195,6 kW. Výměnou tohoto vedení za kabel 1-AYKY 3×240+120 podél celého vývodu se připojitelný výkon zvýšil o 60,9 % na 314,8 kW.

Integrace $Q(U)$ regulace do kabelové sítě způsobila vysoký nárůst připojitelného výkonu zdrojů. Došlo k proudovému přetížení transformátoru, a to v případě s kabely se zmenšujícím se průřezem podél vývodu, i v případě s vyměněným vedením za kabel 1-AYKY 3×240+120 podél celého vývodu. Síť tedy nebyla z hlediska napěťových změn vyvolaných připojením zdrojů nijak limitována.

Připojitelný výkon do kabelové sítě byl vyšší oproti připojitelnému výkonu do sítě s nadzemním vedením. Model kabelové sítě byl totiž složen z kratších úseků vedení větších průřezů.

Vyhodnocení možností zvýšení připojitelného výkonu

Autonomní regulace jalového výkonu zdrojů napětím se pro distribuční společnosti jeví jako ideální možnost, pomocí které je možné dosáhnout zvýšení připojitelného výkonu do distribučních soustav. Investice do výměny vedení, především v zemi uložených kabelů, by totiž vyžadovaly vyšší investiční výdaje těchto společností v porovnání s prostým ustanovením podmínek pro připojení zdrojů, což přinese investiční výdaje provozovatelům zdrojů. Distribuční společnosti hodlají proto tuto možnost na hladině nízkého napětí využívat.

Napěťová nesymetrie

Dále jsme se zabývali napěťovou nesymetrií způsobenou jednofázovými zdroji a odběry. Abychom tento jev posílili, zapojili jsme všechny jednofázové zdroje do fáze A a všechny jednofázové odběry do fáze B.

Maximální hodnoty činitele napěťové nesymetrie ρ_U (%) v nadzemní síti jsme dosáhli ve scénáři s vedením složeném z vodičů 1-AES 4×120 a zavedenou $Q(U)$ regulací. Činitel napěťové nesymetrie dosahoval hodnoty $\rho_U = 0,541$ %.

V kabelové síti s vedením 1-AYKY 3×240+120 dosahoval činitel napěťové nesymetrie nejvyšší hodnoty $\rho_U = 0,594$ %.

V reálných situacích tedy bude napěťová nesymetrie coby limitující faktor připojitelnosti zdrojů zřejmě velmi nepravděpodobná, neboť jednofázové zdroje i odběry jsou určitým způsobem rozmístěny na všechny tři fáze a dochází tak k jisté samovolné symetrizaci.

Přetoky činného výkonu do soustavy VN

Výpočty jsme prováděli pro síť s poměrně nízkým zatížením, čímž jsme modelovali situaci typickou pro provoz fotovoltaických zdrojů, a sice jejich největší výrobu v době nejmenšího odběru výkonu v oblastech s domovní zástavbou. Připojitelný činný výkon generovaný fotovoltaickými zdroji byl vyšší než výkon odběrů, což způsobilo přetoky činného výkonu do vyšší napěťové hladiny.

Nejvyšší hodnota činného výkonu tekoucího do sítě VN se vyskytla v kabelové síti s vedením 1-AYKY3×240+120 a činila $P_{\text{pretok}} = 271,3$ kW.

Problém s přetoky činného výkonu je možné řešit akumulací energie. Velké množství těchto zdrojů bude ale vyžadovat nákladnou integraci nového způsobu řízení elektrizační soustavy v podobě konceptu smart grids, od kterého se dále očekávají výhody pro odběratele.

Diplomovou prací by bylo možné dále rozšířit o modelování akumulace energie, která je na straně výrobců na hladině nízkého napětí velmi rozšířená.

Seznam použité literatury a zdrojů

Tištěná literatura

- [1] BLÁHA, Jaroslav a Karel BRADA. *Hydraulické stroje*. 1. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1992. ISBN 80-03-00665-1.
- [2] DOLEŽAL, Jaroslav. *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [3] DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-118-7.
- [4] FEJT, Z., ČERMÁK, J.: *Elektroenergetika*. Skripta ČVUT, Praha: 1985.
- [5] HAVLÍČEK, Václav, Martin POKORNÝ a Ivan ZEMÁNEK. *Elektrické obvody*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014-. ISBN 978-80-01-05492-5.
- [6] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [7] MERTENS, KONRAD. *Photovoltaics: Fundamentals, Technology, and Practice*. Munich, 2018. ISBN 9781119401049.
- [8] ŠŤASTNÝ, Jiří. *Energetická strojní zařízení*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03585-9.
- [9] TLUSTÝ, Josef. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [10] TLUSTÝ, Josef. *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.
- [11] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.

Elektronické zdroje

[1] 1–AYKY: Zemní kabely s PVC izolací a PVC pláštěm [online]. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: https://www.prakab.cz/upload/1_AYKY.pdf

[2] 4. energetická revoluce je skladování elektřiny, říká Drábová. OEnergetice.cz [online]. 2015 [cit. 2018-12-27]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/akumulace-energie/4-energeticka-revoluce-je-skladovani-elektřiny-rika-drabova/>

[3] Ceník elektřiny u jednotlivých dodavatelů. Ušetřeno [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.usetreno.cz/energie-elektřina/cena-elektřiny#gref>

[4] Ceník plynu u jednotlivých dodavatelů. Ušetřeno [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.usetreno.cz/energie-plyn/cena-plynu/#gref>

[5] ČSN 33 0166: Označování žil kabelů a ohebných šňůr. 2. vyd. Praha : ÚNMZ, 2002.

[6] ČSN EN 50 160: Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí. 3. vyd. Praha : ÚNMZ, 2011.

[7] ČSN EN 50 438: Požadavky na paralelní připojení mikrogenerátorů s veřejnými distribučními sítěmi nízkého napětí. 2. vyd. Praha : ÚNMZ, 2014.

[8] Čtvrtletní zpráva o provozu ES ČR: IV. čtvrtletí 2018 [online]. Praha: Oddělení statistiky a sledování kvality ERÚ, 2018 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Ctvrtletni_zprava_2018_IV_Q.pdf/f47bc2a0-05e3-4402-a1db-5b6e2b0a44a4

[9] Design of solution V1.0: Deliverable D6.1 [online]. 2017 [cit. 2019-04-4]. Dostupné z: <https://interflex-h2020.com/wp-content/uploads/2018/06/D6.1-Design-of-solutions.pdf>

[10] Distribuční síť velmi vysokého napětí 04: Metoda souměrných složek [online]. [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: https://www.energetikainfo.cz/33/distribucni-site-velmi-vysokeho-napeti-04-metoda-soumernych-slozek-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4Ev1_nn3lxjM1rRczQjhPOznVRYFLS2WAvA/

[11] DNCalc: výpočty a simulace distribučních sítí [online]. EGC - EnerGo-Consult ČR [cit. 2019-04-08].

-
- [12] Draka: Silové kabely a vodiče, bezhalogenové kabely se zvýšenou odolností proti šíření plamene, bezhalogenové ohniodolné kabely, výtahové kabely [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: https://www.kvelektro.cz/wp-content/uploads/2015/11/silove_kabely_a_vodice.pdf
- [13] EU a cíle pro obnovitelné zdroje energie v roce 2020. ENERGETIKA info.cz [online]. 2018 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.energetikainfo.cz/33/eu-a-cile-pro-obnovitelne-zdroje-energie-v-roce-2020-uniqueidgOkE4NvrWuMF1Z1s5yTC1cKryOGddTNm3nOpGic-EvM/>
- [14] Fotosyntéza a její účinnost. Sciencemag.cz [online]. 2018 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://sciencemag.cz/fotosynteza-a-jeji-ucinnost/>
- [15] Fotovoltaické panely. SVP SOLAR [online]. [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.solar-eshop.cz/c/fotovoltaika-1/fotovoltaicke-moduly/>
- [16] Gas steam powerplant. Quora [online]. [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: <https://qph.fs.quoracdn.net/main-qimg-d3d9995f10c6726c3a92cfeafe587c08>
- [17] Growth of photovoltaics. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-01-16]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Growth_of_photovoltaics.
- [18] HARMONICKÝ USTÁLENÝ STAV - FÁZOR, IMPEDANCE [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://amber.feld.cvut.cz/vyu/eo1/files/lectures/Prednaska8.pdf>
- [19] Informace o paroplynové energetice. Skupina ČEZ [online]. [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/paroplynove-elektrarny/informace-o-paroplynove-energetice.html>
- [20] Inteligentní sítě vstupují do České republiky. ČEZ Distribuce, a.s. [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/153.html>
- [21] InterFLEX. InterFLEX [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://interflex-h2020.com/>

-
- [22] 'ISRAEL'S ELECTRICAL GRID ATTACKED IN MASSIVE CYBER ATTACK'. Jerusalem Post Israel News [online]. 2016, 2016 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://www.jpost.com/Israel-News/Israels-electrical-grid-attacked-in-massive-cyber-attack-442844>
- [23] JADERNÁ ELEKTRÁRNA. Techmania Science Center [online]. [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/atomy-castice/jaderna-elektrarna>
- [24] Jaderná elektrárna Temelín. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna_Temel%C3%ADn
- [25] Jaký je vývoj fotovoltaiky v České republice? A jak si stojíme v Evropě?. ESTAV.cz [online]. 2018 [cit. 2019-01-16]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/6385.jaky-je-vyvoj-fotovoltaiky-v-ceske-republice-a-jak-si-stojime-v-evrope>.
- [26] JANDUS, Tadeáš. APLIKACE KOGENERAČNÍ JEDNOTKY V RD [online]. 2017 [cit. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68517/F3-BP-2017-Jandus-Tadeas-jandus.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [27] Kdy se vyplatí pořídit si hybridní fotovoltaický systém. Tzb-info.cz [online]. 2017 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/15618-kdy-se-vyplati-poridit-si-hybridni-fotovoltaicky-system>.
- [28] KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. Kogenerační jednotky - zřizování a provoz [online]. 1. Praha: GAS, 2007 [cit. 2018-10-14]. GAS. ISBN 978-80-7328-151-9. Dostupné z: https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf
- [29] LV Aerial Bundled Conductor (ABC) Cables to IEC 60502 Standard. TANO CABLE [online]. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <http://www.tanocable.com/products/overhead-cable/lv-abc/lvabc-cables-to-iec-60502.html>
- [30] MUDRUŇKOVÁ, Anna. Elektrotechnické materiály I. [online]. VOŠ a SPŠ elektrotechnická Františka Křižíka, 2016 [cit. 2019-04-01]. ISBN 978-80-88058-90-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/08.html>

[31] Národní akční plán pro chytré sítě (NAP SG) [online]. III. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2015 [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/52353/60358/633373/priloha003.pdf>

[32] Národní akční plán pro chytré sítě (NAP SG). Ministerstvo průmyslu a obchodu [online]. 2015 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/dokument/156514.html>

[33] Neobnovitelný zdroj energie. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Neobnoviteln%C3%BD_zdroj_energie

[34] OBECNÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ FOTOVOLTAICKÉHO ZDROJE. OEZ [online]. [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: <http://www.oez.cz/aktuality/obecne-schema-zapojeni-fotovoltackeho-zdroje>

[35] Options for Control of Reactive Power by Distributed Photovoltaic Generators [online]. 2011 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <http://www.mit.edu/turitsyn/assets/pubs/Turitsyn2011fv.pdf>

[36] Palivo - Elektrárny. SVĚT ENERGIE: VZDĚLÁVACÍ PORTÁL ČEZ [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/jaderne-elektrarny/palivo>

[37] Photovoltaics. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>.

[38] Pilotní projekt s automatickým odlehčováním spotřeby realitou (RESPO) [online]. Konference ČEZ Měření, a.s. Špindlerův Mlýn, 18.4.2012, 2012 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/o-spolecnosti/dcerine-spolecnosti/cez-mereni/konference_2012/City-Plan_Benes_CZ.pptx

[39] Plutonium 239. Nuclear Power [online]. [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/plutonium/plutonium-239>

[40] PNE 33 3430-3: Parametry kvality elektrické energie – Část 3: Nesymetrie a změny kmitočtu napětí. 3. 2011.

-
- [41] Pravidla provozování distribuční soustavy 2006 [online]. 1. 2006 [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds-text-2006.pdf>
- [42] PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV: PŘÍLOHA 3 KVALITA NAPĚTÍ V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ, ZPŮSOBY JEJÍHO ZJIŠŤOVÁNÍ A HODNOCENÍ [online]. 2011 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2011/ppds-2011_priloha-3.pdf
- [43] PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV: PŘÍLOHA 4 PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ VÝROBEN A AKUMULAČNÍCH ZAŘÍZENÍ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY [online]. 2018 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2018_priloha-4.pdf
- [44] Projekt InterFLEX. ČEZ Distribuce, a.s. [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/projekt-interflex.html>
- [45] Projekt Smart Region ve Vrchlabí. ČEZ Distribuce, a.s. [online]. [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/pro-media/smart-region.html>
- [46] PVinsights. PVinsights [online]. 2019 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <http://pvinsights.com/>
- [47] PQ-diagram for a single-phase PV inverter. Research Gate [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/PQ-diagram-for-a-single-phase-PV-inverter_fig4_260316832
- [48] Radioaktivní důl plný nejistoty. VTM.cz [online]. [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <http://vtm.e15.cz/asse-ii-je-radioaktivni-dul-plny-nejistoty>
- [49] Roční zpráva o provozu ES ČR: 2017 [online]. Praha: Oddělení statistiky a sledování kvality ERÚ, 2018 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2017.pdf/521bff99-fdcf-4c86-8922-3a346af0bb88
- [50] Ropa. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Ropa>

-
- [51] Petroleum. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Petroleum>
- [52] Sítě TN. ELUC [online]. [cit. 2019-0-3-12]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/391>
- [53] SLOŽENÍ UHLÍ. OKD [online]. [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.okd.cz/cs/tezime-uhli/uhli-tradici-zdroj-energie/slozeni-uhli>
- [54] Slunce. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-11-28]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Slunce>
- [55] Smart grids. Siemens Česká republika [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.siemens.cz/smartcities/smart-grids>
- [56] Součástky lineární a nelineární. ELUC [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/531>
- [57] TECHNICKÁ POLITIKA - ROZVOJ DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ A TECHNOLOGICKÝCH PRVKŮ V DSO: PŘÍLOHA č.1 – KONCEPCE KABELOVÝCH SÍTÍ NN [online]. s. 5. ČEZ Distribuce, a. s. Oddělení Technická politika, 2006 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/technicke-informace/priloha-1.doc>
- [58] The Shockley Queisser Efficiency Limit. Solarcellcentral [online]. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: http://solarcellcentral.com/limits_page.html
- [59] Tokamak. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Tokamak#Oh%C5%99ev_plazmatu
- [60] Total Energy. Enerdata: Global Energy Statistical Yearbook 2018 [online]. 2019 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>

-
- [61] TYPY UHLÍ. OKD [online]. [cit. 2019-03-03].
Dostupné z: <https://www.okd.cz/cs/tezime-uhli/uhli-tradicni-zdroj-energie/typy-uhli>
- [62] ÚBYTKY NAPĚTÍ V ES: Jednoduchá ss vedení nn, vn [online]. [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/EN2/EN2_pr04_ubytiky.pdf
- [63] UHELNÉ PARNÍ ELEKTRÁRNY. Energyweb [online]. [cit. 2019-03-15].
Dostupné z: http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=2&slovník_page=uhel_el.html
- [64] Uran (prvek). In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Uran_\(prvek\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Uran_(prvek))
- [65] Větrné elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR. OEnergetice.cz [online]. 2015 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/typy-elektraren/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni/>
- [66] Víte, co to je a jak funguje smart grid?. Proelektrotechniky.cz [online]. [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/22.php>
- [67] Vodič (elektrotechnický výrobek). In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Vodi%C4%8D_\(elektrotechnick%C3%BD_v%C3%BDrobek\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Vodi%C4%8D_(elektrotechnick%C3%BD_v%C3%BDrobek))
- [68] Vodní elektrárna. Příroda.cz [online]. [cit. 2019-04-05].
Dostupné z: https://www.priroda.cz/detail_foto.php?id1=100&id2=95
- [69] VYHLÁŠKA č. 16/2016 Sb.: o podmínkách připojení k elektrizační soustavě. In: . ERÚ, 2016, ročník 2016, číslo 16. Dostupné také z: <http://www.eru.cz/documents/10540/463080/Vyhl%C3%A1%C5%A1ka+o+podm%C3%ADnk%C3%A1ch+p%C5%99ipojen%C3%AD%20k+elektriza%C4%8Dn%C3%AD%20soustav%C4%9B/e40a8453-37b6-4b06-848e-c4eac97a886a>
- [70] Výukové materiály předmětu Aplikace solárních systémů (B1M13ASS), České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.

[71] KOČÁRNÍK, Petr. Větrné elektrárny: Výukové materiály předmětu Strojní struktury elektráren (B1M14SSE), České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.

[72] Využití smart meteringu v systému zúčtování elektrické energie – II. Tzbinfo [online]. 2018 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/17444-vyuziti-smart-meteringu-v-systemu-zuctovani-elektricke-energie-ii>

[73] What is coal?. World coal association [online] . [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.worldcoal.org/coal/what-coal>

[74] Zákon o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. In: Sbírka zákonů České republiky. Praha: Ministerstvo vnitra, 2012, ročník 2012, částka 59, číslo 165. Dostupné také z: <https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=z&id=24254>.

[75] Zemní plyn. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Zemn%C3%AD_plyn

[76] Zprávy o provozu elektrizační soustavy. Energetický regulační úřad [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/zpravy-o-provozu-elektrizacni-soustavy>

Příloha Nadzemní síť

Parametry nadzemního vedení AlFe6					
Typ	R (Ωkm^{-1})	X (Ωkm^{-1})	I_{\max} (A)	$R0/R1$ (1)	$X0/X1$ (1)
AlFe6 4×25	1,390	0,313	128	3	3
AlFe6 4×35	0,970	0,302	161	3	3
AlFe6 3×50+35	0,690	0,291	205	3	3
AlFe6 3×70+50	0,501	0,279	254	3	3

Parametry nadzemního vedení AlFe6

Parametry nadzemního vedení 1-AES					
Typ	R (Ωkm^{-1})	X (Ωkm^{-1})	I_{\max} (A)	$R0/R1$ (1)	$X0/X1$ (1)
AES 4×50	0,641	0,086	140	2,78	6,42
AES 4×70	0,443	0,084	178	3,01	5,27
AES 4×95	0,320	0,083	220	3,13	4,56
AlFe 4×120	0,253	0,082	265	3,19	4,23

Parametry nadzemního vedení 1-AES

Délky úseků nadzemní sítě	
Úsek	Délka (m)
V11	100
V12	300
V13	200
V14	100
V15	300
V16	100
V21	100
V22	100
V23	50
V24	50
V25	50
V26	50
V27	50
V31	100
V32	300
V33	100
V34	100
V35	50
V36	50
V41	100
V42	300
V43	100
V44	100
V45	200
V46	200
V47	100

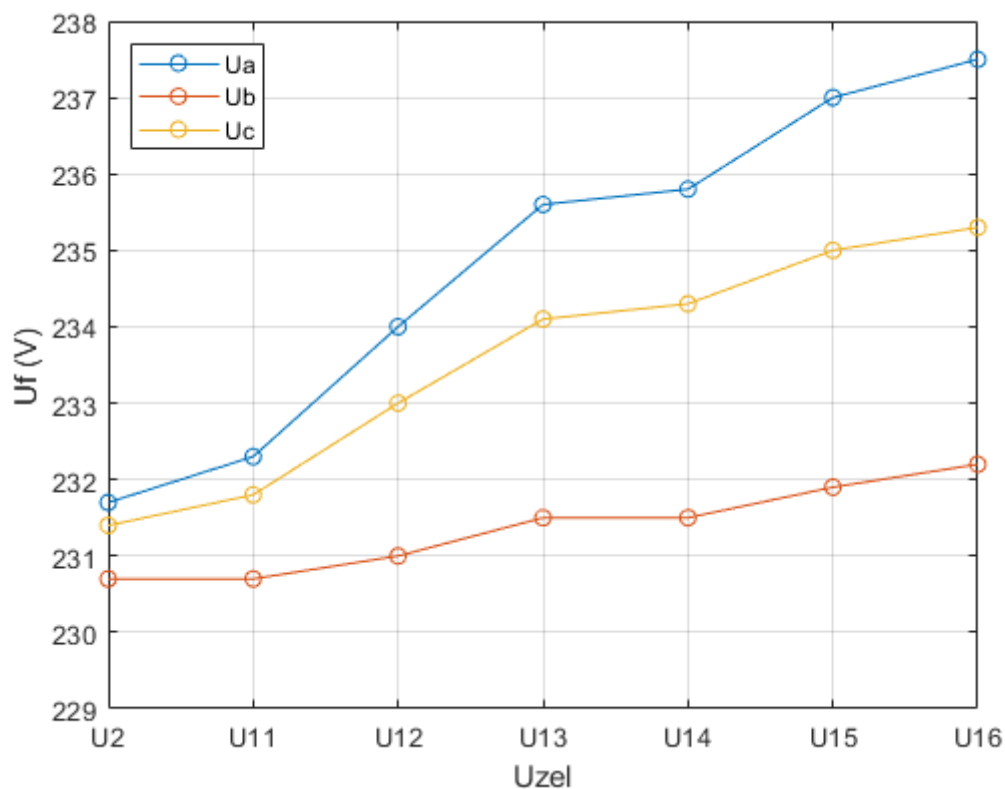
Délky úseků nadzemní sítě

Parametry ekvivalentu nadřazené soustavy 22 kV — nadzemní síť		
Parametr	Popis	Hodnota
U_n	Jmenovité napětí	22 kV
U_{provoz}	Provozní napětí	23,1 kV
S_{zkr}	Zkratový výkon	38,105 MVA
R/X	Poměr odporu k reaktanci	0,6

Parametry ekvivalentu nadřazené soustavy 22 kV — nadzemní síť

Parametry distribučního transformátoru 22/0,4 kV — nadzemní síť		
Parametr	Popis	Hodnota
U_{n1}	Jmenovité nap. prim. vinutí	22 kV
U_{n2}	Jmenovité nap. sek. vinutí	0,4 kV
I_{n1}	Jmenovitý proud prim. strany	4,2 A
I_{n2}	Jmenovitý proud sek. strany	231 A
S_n	Jmenovitý výkon	160 kVA
i_0	Poměrný proud naprázdno	0,4 %
P_0	Ztráty naprázdno	0,21 kW
u_k	Poměrné napětí nakrátko	4 %
P_k	Ztráty nakrátko	2,35 kW
—	Regulace odboček	$\pm 2 \times 2,5\% U_{n1}$
—	Zapojení	D/yn

Parametry distribučního transformátoru 22/0,4 kV — nadzemní síť



Scénář *Původní* — napětí podél vývodu — nadzemní síť

Odběry připojené v celé nadzemní síti		
Jednofázové	Třífázové	<i>P</i> (kW)
Z11n	Z11	0,397
Z12n	Z12	0,147
Z13n	Z13	0,099
Z14n	Z14	0,083
Z15n	Z15	0,049
Z16n	Z16	0,038
Z21n	Z21	0,516
Z22n	Z22	0,351
Z23n	Z23	0,303
Z24n	Z24	0,266
Z25n	Z25	0,237
Z26n	Z26	0,212
Z27n	Z27	0,195
Z31n	Z31	0,510
Z32n	Z32	0,236
Z33n	Z33	0,204
Z34n	Z34	0,177
Z35n	Z35	0,153
Z36n	Z36	0,136
Z41n	Z41	0,644
Z42n	Z42	0,309
Z43n	Z43	0,190
Z44n	Z44	0,149
Z45n	Z45	0,101
Z46n	Z46	0,068
Z47n	Z47	0,055

Odběry připojené v celé nadzemní síti

Velikosti sumárních zátěží zbylých vývodů — nadzemní síť			
Vývody	Jednofázové	Třífázové	<i>P</i> (kW)
V2, V3, V4	Z1f234	Z3f234	5,012
V1, V3, V4	Z1f134	Z3f134	3,745
V1, V2, V4	Z1f124	Z3f124	4,409
V1, V2, V3	Z1f123	Z3f123	4,309

Velikosti sumárních zátěží zbylých vývodů — nadzemní síť

Scénář — <i>Původní</i> — nadzemní síť	
Úsek	Typ vedení
V11	AlFe 3×70+50
V12	AlFe 3×70+50
V13	AlFe 3×50+35
V14	AlFe 3×50+35
V15	AlFe 4×35
V16	AlFe 4×25
V21	AYKY 3×120+70
V22	AES 4×120
V23	AES 4×120
V24	AES 4×95
V25	AES 4×95
V26	AES 4×70
V27	AES 4×50
V31	AYKY 3×120+70
V32	AES 4×120
V33	AES 4×120
V34	AES 4×95
V35	AES 4×70
V36	AES 4×50
V41	AYKY 3×240+120
V42	AYKY 3×120+70
V43	AlFe 3×70+50
V44	AlFe 3×70+50
V45	AlFe 3×50+35
V46	AlFe 4×35
V47	AlFe 4×25

Scénář — *Původní* (zmenšující se průřez vodičů podél vývodů) — nadzemní síť

Výkony zapojených zdrojů (kW) — nadzemní síť					
Scénář	Fáze	Výkonová kategorie			Zbývá část sítě
		1	6	3	
Původní	1f	0,063	0,381	0,191	2,745
	3f	0,603	3,615	1,807	26,301
Původní + Q(U)	1f	0,101	0,607	0,303	4,369
	3f	0,959	5,753	2,876	41,425
AES120	1f	0,160	0,963	0,481	4,321
	3f	1,521	9,125	4,562	40,975
AES120 + Q(U)	1f	0,298	1,743	0,870	7,820
	3f	2,752	16,514	8,257	74,157

Výkony zapojených zdrojů (kW) — nadzemní síť

Velikost fázových napětí v uzlech — nadzemní síť				
Scénář	Uzel	U_a (V)	U_b (V)	U_c (V)
Původní	U ₂	231,7	230,7	231,4
	U ₁₁	232,3	230,7	231,8
	U ₁₂	234,0	231,0	233,0
	U ₁₃	235,6	231,5	234,1
	U ₁₄	235,8	231,5	234,3
	U ₁₅	237,0	231,9	235,0
	U ₁₆	237,5	232,2	235,3
Původní + Q(U)	U ₂	230,3	229,7	230,4
	U ₁₁	231,0	229,6	231,0
	U ₁₂	232,9	229,8	232,5
	U ₁₃	234,9	230,4	234,0
	U ₁₄	235,3	230,5	234,3
	U ₁₅	236,8	231,0	235,4
	U ₁₆	237,5	231,3	235,9
AES120	U ₂	232,4	231,3	231,9
	U ₄₁	232,9	231,2	232,3
	U ₄₂	235,4	231,4	233,8
	U ₄₃	236,2	231,7	234,3
	U ₄₄	236,4	231,7	234,5
	U ₄₅	236,9	231,9	234,8
	U ₄₆	237,4	232,1	235,2
	U ₄₇	237,7	232,2	235,3
AES120 + Q(U)	U ₂	229,9	229,5	230,0
	U ₄₁	230,5	229,2	230,6
	U ₄₂	234,3	229,7	233,5
	U ₄₃	235,4	230,0	234,4
	U ₄₄	235,8	230,1	234,7
	U ₄₅	236,5	230,3	235,2
	U ₄₆	237,3	230,6	235,8
	U ₄₇	237,7	230,8	236,1

Velikost fázových napětí v uzlech — nadzemní síť

Nap. nesymetrie vývodu — nadzemní síť		
Scénář	Uzel	ρ_U (%)
Původní	U11	0,238
	U12	0,314
	U13	0,370
	U14	0,382
	U15	0,419
	U16	0,434
Původní+Q(U)	U11	0,232
	U12	0,324
	U13	0,403
	U14	0,415
	U15	0,466
	U16	0,490
AES120	U41	0,264
	U42	0,333
	U43	0,356
	U44	0,364
	U45	0,380
	U46	0,395
	U47	0,402
AES120+Q(U)	U41	0,328
	U42	0,430
	U43	0,468
	U44	0,479
	U45	0,503
	U46	0,528
	U47	0,541

Tabulka 12.16: Napěťová nesymetrie v uzlech vývodu — nadzemní síť

Velikost proudů sek. vin. TRF (uzel U2) — nadzemní síť			
Scénář	I_a (A)	I_b (A)	I_c (A)
Původní	52,2	16,8	37,8
Původní + Q(U)	101,3	61,8	75,6
AES120	97,3	48,6	72,2
AES120 + Q(U)	204,8	138,5	154,5

Velikost proudů sek. vin. trf. (uzel U2) — nadzemní síť

Výkony sek. vin. TRF (uzel U2) — nadzemní síť			
Scénář	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)
Původní	23,7	-3,9	24,0
Původní + $Q(U)$	44,5	-31,3	54,3
AES120	50,3	-3,9	50,4
AES120 + $Q(U)$	98,5	-57,8	114,1

Výkony sek. vin. trf. (uzel U2): *kladné* do soustavy VN, *záporné* ze soustavy VN — nadzemní síť

Proud vodičem PEN <i>Původní</i> — nadzemní síť	
Uzel U2/ Větve	I_v (A)
U2	38,5
V11	5,9
V12	4,0
V13	3,3
V14	1,4
V15	1,0
V16	0,9

Proud vodičem PEN scénář *Původní* — nadzemní síť

Proud vodičem PEN <i>Původní+Q(U)</i> — nadzemní síť	
Uzel U2/ Větve	I_v (A)
U2	51,6
V11	8,3
V12	6,0
V13	5,3
V14	2,1
V15	1,7
V16	1,5

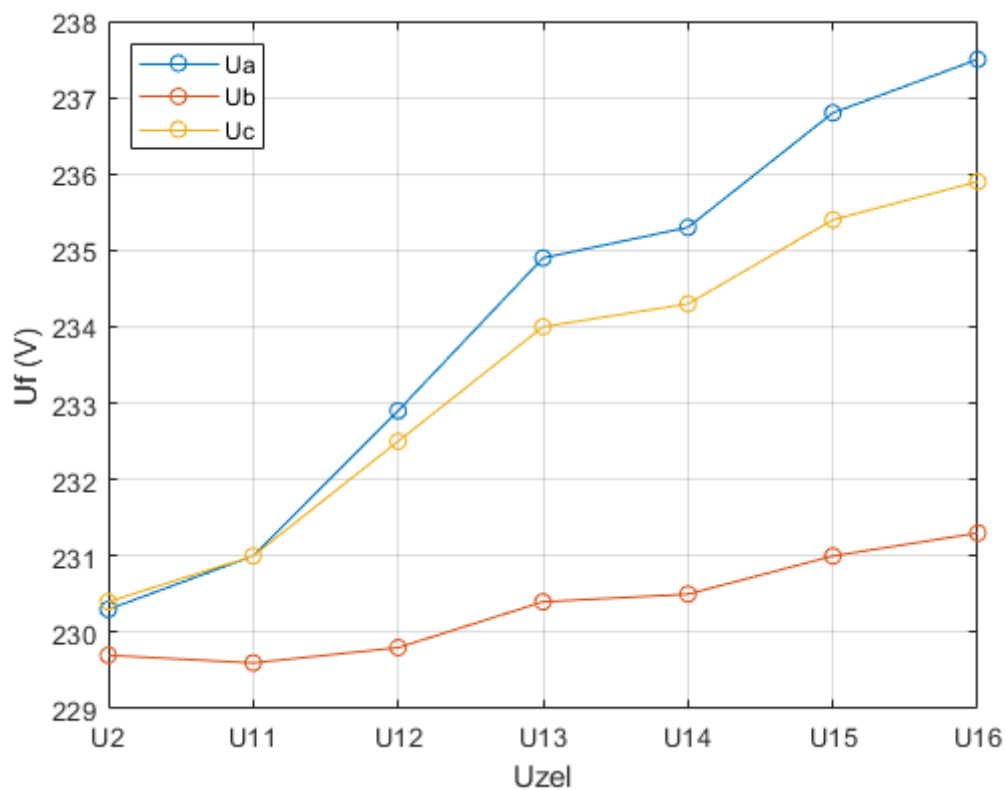
Proud vodičem PEN scénář *Původní+Q(U)* — nadzemní síť

Proud vodičem PEN <i>AES120</i> — nadzemní síť	
Uzel U2/ Větve	I_v (A)
U2	48,1
V41	12,6
V42	9,3
V43	8,0
V44	3,4
V45	2,8
V46	2,4
V47	2,1

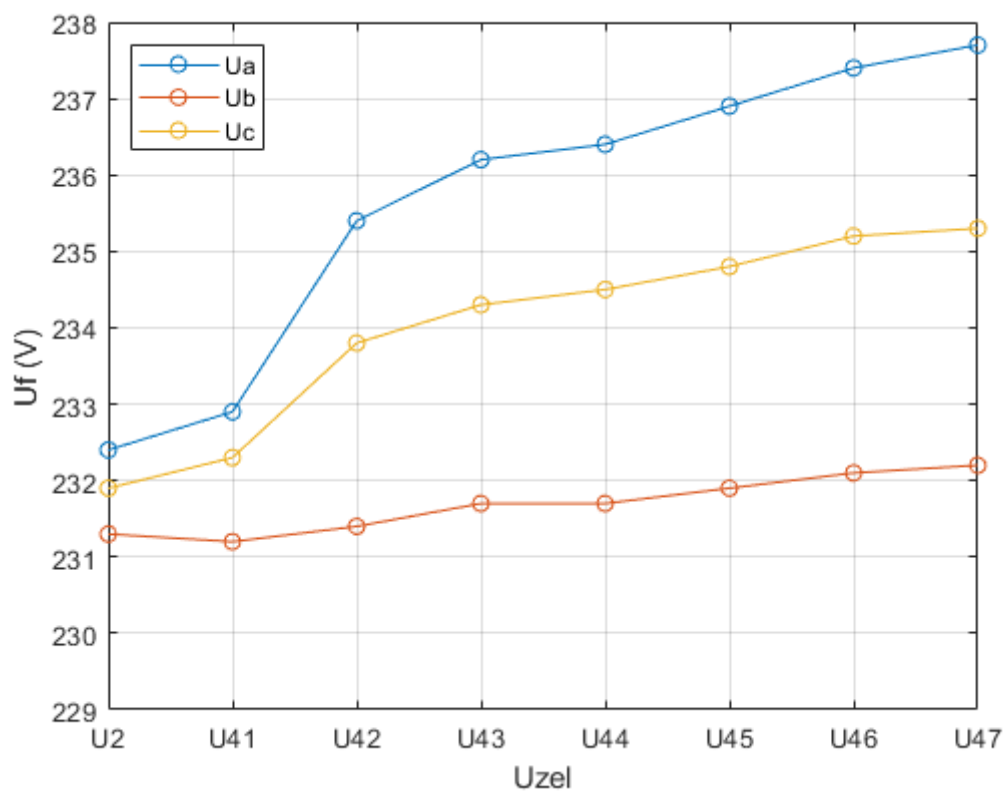
Proud vodičem PEN *AES120* — nadzemní síť

Proud vodičem PEN $AES120+Q(U)$ — nadzemní síť	
Uzel U2/ Větve	I_v (A)
U2	75,9
V41	20,0
V42	15,7
V43	14,3
V44	5,6
V45	4,9
V46	4,4
V47	4,1

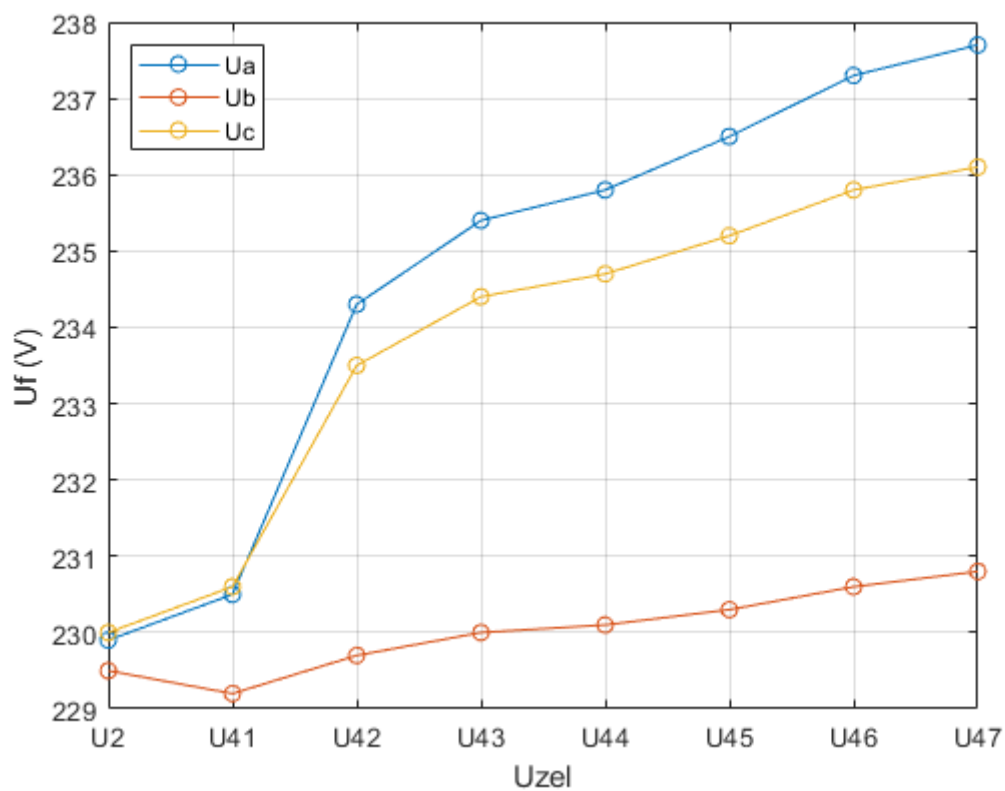
Proud vodičem PEN scénář $AES120+Q(U)$ — nadzemní síť



Scénář *Původní + Q(U)* — napětí podél vývodu — nadzemní síť



Scénář *AES120* — napětí podél vývodu — nadzemní síť



Scénář *AES120 + $Q(U)$* — napětí podél vývodu — nadzemní síť

Příloha Kabelová síť

Parametry kabelů 1-AYKY-J					
Typ	R (Ωkm^{-1})	X (Ωkm^{-1})	I_{\max} (A)	$R0/R1$ (1)	$X0/X1$ (1)
3×70+50	0,442	0,0730	183	4,07	10,72
3×120+70	0,258	0,0690	245	4,58	6,42
3×240+120	0,125	0,0754	338	5,42	5,12

Parametry kabelů 1-AYKY-J

Parametry ekvivalentu nadřazené soustavy 22 kV — kabelová síť		
Parametr	Popis	Hodnota
U_n	Jmenovité napětí	22 kV
U_{provoz}	Provozní napětí	23,1 kV
S_{zkr}	Zkratový výkon	38,105 MVA
R/X	Poměr odporu k reaktanci	0,6

Parametry ekvivalentu nadřazené soustavy 22 kV — kabelová síť

Parametry distribučního transformátoru 22/0,4 kV — kabelová síť		
Parametr	Popis	Hodnota
U_{n1}	Jmenovité nap. prim. vinutí	22 kV
U_{n2}	Jmenovité nap. sek. vinutí	0,4 kV
I_{n1}	Jmenovitý proud prim. strany	10,5 A
I_{n2}	Jmenovitý proud sek. strany	578 A
S_n	Jmenovitý výkon	400 kVA
i_0	Poměrný proud naprázdno	0,4 %
P_0	Ztráty naprázdno	0,43 kW
u_k	Poměrné napětí nakrátko	4 %
P_k	Ztráty nakrátko	4,6 kW
—	Regulace odboček	$\pm 2 \times 2,5\% U_{n1}$
—	Zapojení	D/yn

Parametry distribučního transformátoru 22/0,4 kV — kabelová síť

Délky úseků kabelové sítě	
Úsek	Délka (m)
V11	100
V12	100
V13	100
V14	50
V21	100
V22	100
V23	100
V24	50
V31	100
V32	100
V33	100
V34	50
V41	100
V42	100
V43	100
V44	50
V45	50
V51	100
V52	100
V53	100
V54	50
V55	50
V61	100
V62	100
V63	100
V64	50
V65	50

Délky úseků kabelové sítě

Odběry připojené v celé kabelové síti		
Jednofázové	Třífázové	<i>P</i> (kW)
Z11n	Z11	1,540
Z12n	Z12	0,952
Z13n	Z13	0,663
Z14n	Z14	0,569
Z21n	Z21	1,540
Z22n	Z22	0,952
Z23n	Z23	0,663
Z24n	Z24	0,569
Z31n	Z31	1,540
Z32n	Z32	0,952
Z33n	Z33	0,663
Z34n	Z34	0,569
Z41n	Z41	1,207
Z42n	Z42	0,798
Z43n	Z43	0,541
Z44n	Z44	0,485
Z45n	Z45	0,440
Z51n	Z51	1,207
Z52n	Z52	0,798
Z53n	Z53	0,541
Z54n	Z54	0,541
Z55n	Z55	0,440

Odběry připojené v celé kabelové síti

Velikosti sumárních zátěží zbylých vývodů — kabelová síť			
Vývody	Jednofázové	Třífázové	<i>P</i> (kW)
V2, V3, V4, V5, V6	Z1f23456	Z3f23456	17,861
V1, V3, V4, V5, V6	Z1f13456	Z3f13456	17,861
V1, V2, V4, V5, V6	Z1f12456	Z3f12456	17,861
V1, V2, V3, V5, V6	Z1f12356	Z3f12356	18,114
V1, V2, V3, V4, V6	Z1f12346	Z3f12346	18,114
V1, V2, V3, V4, V5	Z1f12345	Z3f12345	18,114

Velikosti sumárních zátěží zbylých vývodů — kabelová síť

Scénář <i>Původní</i> — kabelová síť	
Úsek	Typ vedení
V11	AYKY 3×240+120
V12	AYKY 3×120+70
V13	AYKY 3×70+50
V14	AYKY 3×70+50
V21	AYKY 3×240+120
V22	AYKY 3×120+70
V23	AYKY 3×120+70
V24	AYKY 3×70+50
V31	AYKY 3×240+120
V32	AYKY 3×120+70
V33	AYKY 3×120+70
V34	AYKY 3×70+50
V41	AYKY 3×120+70
V42	AYKY 3×120+70
V43	AYKY 3×120+70
V44	AYKY 3×70+50
V45	AYKY 3×70+50
V51	AYKY 3×120+70
V52	AYKY 3×120+70
V53	AYKY 3×120+70
V54	AYKY 3×70+50
V55	AYKY 3×70+50
V61	AYKY 3×120+70
V62	AYKY 3×120+70
V63	AYKY 3×120+70
V64	AYKY 3×70+50
V65	AYKY 3×70+50

Scénář *Původní* (zmenšující se průřez vodičů podél vývodů) — kabelová síť

Výkony zapojených zdrojů (kW) — kabelová síť					
Scénář	Fáze	Výkonová kategorie			Zbylá část sítě
		1	6	3	
Původní	1f	0,312	1,876	0,934	15,564
	3f	2,949	17,690	8,845	147,420
AYKY240	1f	0,502	3,006	1,503	25,054
	3f	4,747	28,476	14,239	237,310

Výkony zapojených zdrojů (kW) — kabelová síť

Nap. nesymetrie vývodu — kabelová síť		
Scénář	Uzel	ρ_U (%)
Původní	U41	0,434
	U42	0,481
	U43	0,500
	U44	0,514
	U45	0,526
AYKY240	U41	0,527
	U42	0,567
	U43	0,581
	U44	0,588
	U45	0,594

Tabulka 12.31: Napěťová nesymetrie v uzlech vývodu — nadzemní síť

Velikost fázových napětí v uzlech — kabelová síť				
Scénář	Uzel	U_a (V)	U_b (V)	U_c (V)
Původní	U ₂	232,6	231,2	232,0
	U ₄₁	234,5	230,9	233,2
	U ₄₂	236,2	230,8	234,2
	U ₄₃	236,8	230,6	234,6
	U ₄₄	237,2	230,6	234,9
	U ₄₅	237,7	230,7	235,2
Původní + Q(U)	U ₂	233,8	232,2	232,9
	U ₄₁	235,3	232,0	233,9
	U ₄₂	236,6	232,1	234,8
	U ₄₃	237,1	231,9	235,1
	U ₄₄	237,3	231,9	235,2
	U ₄₅	237,5	232,0	235,4

Velikost fázových napětí v uzlech

Proudy sek. vin. TRF (uzel U2) — kabelová síť			
Scénář	I_a (A)	I_b (A)	I_c (A)
Původní	302,0	136,9	222,9
AYKY240	503,0	287,8	376,3

Velikost proudů sek. vin. TRF (uzel U2) — kabelová síť

Výkony sek. vin. TRF (uzel U2) — kabelová síť			
Scénář	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)
Původní	152,1	-14,3	152,7
AES120	271,3	-14,4	271,7

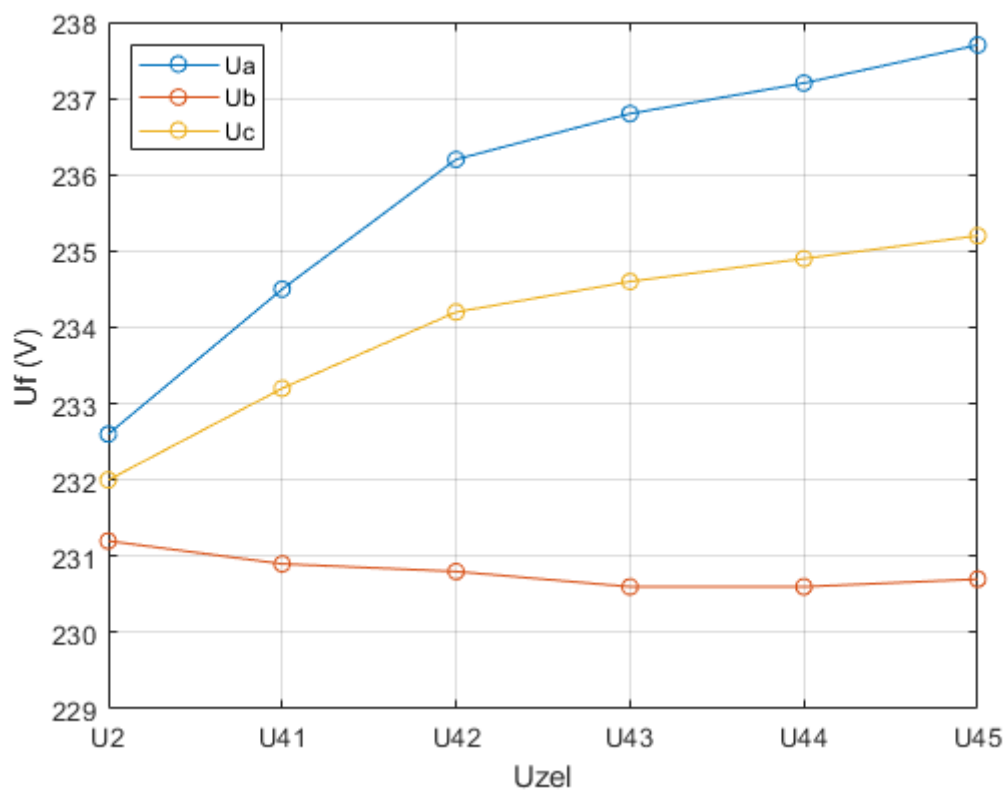
Výkony sek. vin. TRF (uzel U2): *kladné* do soustavy VN, *záporné* ze soustavy VN — kabelová síť

Proud vodičem PEN <i>Původní</i> — kabelová síť	
Uzel U2/ Větve	I_v (A)
U2	165,0
V41	26,7
V42	20,3
V43	9,8
V44	7,5
V45	5,4

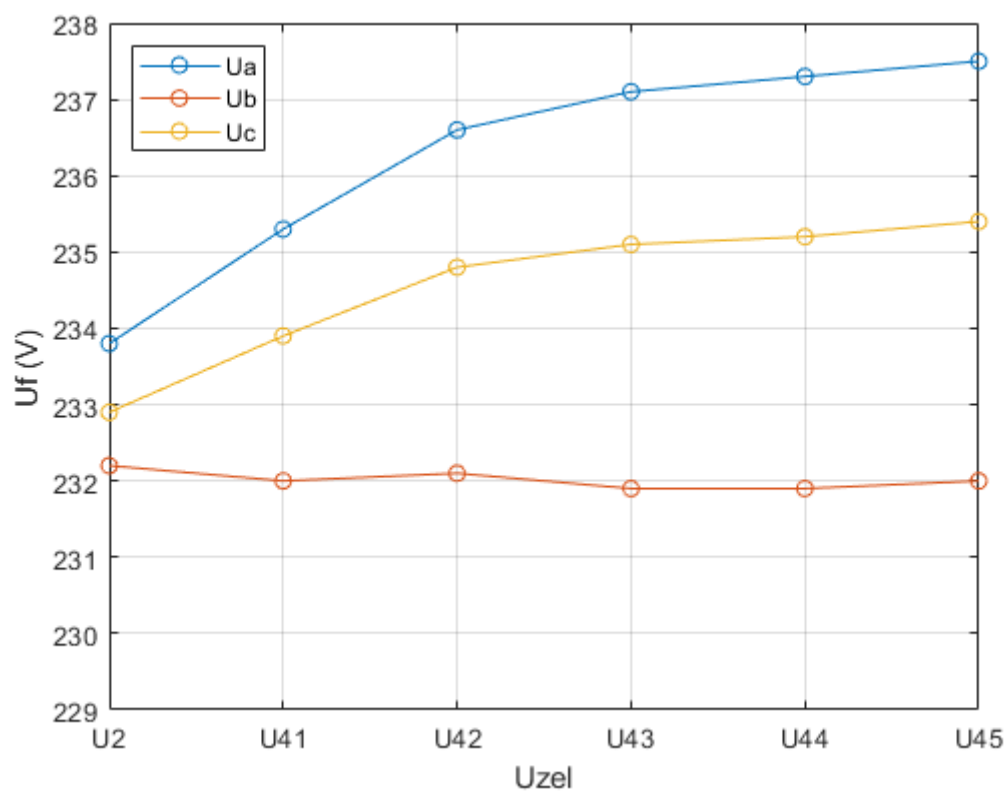
Proud vodičem PEN *Původní* — kabelová síť

Proud vodičem PEN scénář <i>AYKY240</i> — kabelová síť	
Uzel U2/ Větve	I_v (A)
U2	209,0
V41	34,0
V42	27,0
V43	11,0
V44	9,7
V45	7,7

Proud vodičem PEN scénář *AYKY240* — kabelová síť



Scénář *Původní* — napětí podél vývodu — kabelová síť



Scénář *AYKY240* — napětí podél vývodu — kabelová síť