

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra energetiky**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Diploma Thesis**

Připojení výroby elektřiny k distribuční síti

Connecting the Electricity Generating Plant to the Distribution Grid

**Studijní program:** Elektrotechnika, energetika a management

**Studijní obor:** Elektroenergetika

**Vedoucí práce:** Ing. František Vybíralík, CSc.

**2015**

**Václav Hájek**

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Václav Hájek**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Připojení výroby elektřiny k distribuční síti**

Pokyny pro vypracování:

V teplárně se plánuje instalace kogenerační jednotky a její připojení k distribuční síti. Pro žádost o připojení této výroby elektřiny k distribuční síti je nutno provést výpočet vlivů na distribuční síť. Pro tento úkol proveďte:

- 1) Zpracujte přehled základních typů výroben elektřiny využívající OZE.
- 2) Uveďte základní legislativní dokumenty pro připojování výroben elektřiny k distribuční síti.
- 3) Stanovte vlivy výroby na distribuční síť.
- 4) Vyhodnocení výsledků s ohledem na konkrétní situaci v síti.

Seznam odborné literatury:

- [1] Mastný, P., Drápela, J., Mišák, S., Macháček, J., Ptáček, M., Radil, L., Bartošík, T., Pavelka, T., Obnovitelné zdroje elektrické energie, České vysoké učení technické v Praze, 2011. 256s. ISBN 978-80-01-04937-2
- [2] Toman, P., Drápela, J., Mišák, S., Orságová, J., Paar, M., Topolánek, D., a kol., Provoz distribučních soustav, České vysoké učení technické v Praze, 2011. 264s. ISBN 978-80-01-04935-8

Vedoucí: Ing. František Vybíralík, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

## **Prohlášení**

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 Praze, dne

Podpis

## **Poděkování**

Děkuji a velice si vážím odborné a obětavé pomoci a cenných rad od mého konzultanta pana Ing. Františka Vybíralíka, CSc. a dalších lidí z katedry elektroenergetiky.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá připojením výroben elektrické energie k distribuční síti a legislativou s tím spojenou. Obsahuje také základní rozdělení a princip funkce výroben elektrické energie z obnovitelných zdrojů.

Klíčová slova: obnovitelné zdroje; výrobná; připojení; chod sítě; distribuční soustava; legislativa; vlivy

## **Abstract**

The diploma thesis deals with connecting the electricity generating plants to the distribution grid and legislation. It contains basic distribution and principles of function renewable resources.

Key words: renewable resources, power plant, connection, load flow, distribution grid, legislation, impact

# Obsah

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>1 OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE (OZE).....</b>	<b>10</b>
1.1 POSOUZENÍ ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ OZE .....	12
1.2 OZE A SOUČASNÁ SITUACE .....	12
<b>2 DRUHY VÝROBEN ELEKTRINY Z OZE .....</b>	<b>15</b>
2.1 SOLÁRNÍ SYSTÉMY.....	15
2.1.1 Koncentrátorové solární systémy (KSE) .....	15
2.1.2 Fotovoltaické elektrárny .....	17
2.1.2.1 Druhy fotovoltaických elektráren .....	18
2.1.2.2 Princip funkce solárního článku .....	19
2.1.2.3 Základní rozdělení solárních článků .....	19
2.2 VÝROBNY ELEKTRINY Z BIOMASY .....	21
2.3 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY .....	24
2.3.1 Princip činnosti větrné elektrárny .....	25
2.3.2 GENERÁTORY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN .....	27
2.4 VODNÍ ELEKTRÁRNY.....	29
2.4.1 Princip a druhy vodních elektráren .....	29
2.4.2 Základní druhy vodních turbín .....	31
2.4.2.1 Bánkiho turbína .....	32
2.4.2.2 Peltonova turbína .....	34
2.4.2.3 Francisova turbína .....	35
2.4.2.4 Kaplanova turbína .....	37
2.4.3 Generátory vodních elektráren.....	38
2.4.3.1 Asynchronní generátor .....	38
2.4.3.2 Synchronní generátor .....	39
<b>3 LEGISLATIVA A VÝROBNY .....</b>	<b>41</b>
<b>4 VÝROBNY A DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA .....</b>	<b>43</b>
4.1 POJMY .....	43
4.2 PŘIPOJENÍ VÝROBNY K SÍTI .....	43
4.2.1 Spínací zařízení .....	44
4.2.2 Ochrany .....	44
4.2.3 Normální provozní podmínky.....	45

4.2.4 Zásady podpory sítě .....	45
4.2.5 Podmínky pro připojení.....	46
4.2.5.1 Zvýšení napětí.....	46
4.2.5.2 Změny napětí při spínání .....	47
4.2.5.3 Připojování synchronních generátorů .....	48
4.2.5.4 Připojování asynchronních generátorů.....	48
4.2.5.5 Připojování výroben se střídači.....	48
4.2.5.6 Výjimky pro výroby s obnovitelnými zdroji.....	48
4.2.6 Zpětné vlivy na napájecí síť.....	49
4.2.6.1 Změny napětí.....	49
4.2.6.2 Flickr .....	49
4.2.6.3 Proudý harmonických .....	49
4.2.6.4 Zpětné vlivy a HDO .....	53
4.2.7 PŘIPOJENÍ VÝROBNY Z NADZEMNÍHO VEDENÍ VN PŘÍPOJKOU VÝROBCE .....	54
<b>5 OVĚŘENÍ VLIVU TEPLÁRNY NA DISTRIBUČNÍ SOUSTAVU .....</b>	<b>55</b>
5.1 LOKALIZACE TEPLÁRNY .....	55
5.2 TECHNICKÁ DATA PLÁNOVANÉHO GENERÁTORU .....	55
5.3 ZKOUMANÝ ÚSEK SÍTĚ.....	57
5.3.1 Parametry napájecího bodu .....	59
5.3.2 Parametry vedení.....	61
5.3.3 Parametry odběrů.....	61
5.3.4 Parametry výroben v distribuční síti .....	62
5.4 MODELACE USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ .....	63
5.4.1 Napěťový profil podél vedení, ztráty.....	64
5.4.2 Vyšší harmonické v síti.....	66
5.4.3 Vliv generátoru na útlum signálu HDO .....	68
5.4.4 Kolísání napětí v síti, flickr .....	69
5.4.5 Vliv generátoru na napětí v připojovacím bodu.....	69
<b>6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PRO KONKRÉTNÍ SITUACI V SÍTI.....</b>	<b>71</b>
<b>ZÁVĚR A SHRUTÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE.....</b>	<b>72</b>
<b>SEZNAM LITERATURY .....</b>	<b>73</b>
<b>7 PŘÍLOHY .....</b>	<b>77</b>
7.1 USTÁLENÝ CHOD SÍTĚ, HRUBÁ DATA.....	77
7.1.1 Výpočet sítě bez generátoru G1.....	77
7.1.2 Parametry v uzlech sítě s G1 s účínkem 0,95 .....	78
7.1.3. Parametry v uzlech sítě s G1 s účínkem 0,98 .....	80
7.1.4 Parametry v uzlech sítě s G1 s účínkem 1 .....	81



7.1.5. Parametry v uzlech síť s G1 s účíníkem -0,999.....	83
7.1.6 Parametry v uzlech síť s G1 s účíníkem -0,98.....	85
7.1.7 Parametry v uzlech síť s G1 s účíníkem -0,95.....	86

## Seznam použitých zkratk a symbolů

nn	nízké napětí
vn	velmi vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
OZE	obnovitelné zdroje energie
HDO	hromadné dálkové ovládání
PPDS	pravidla provozování distribučních soustav
DS	distribuční soustava
EU	Evropská unie
ČR	Česká republika

## Úvod

Elektřina je forma energie, bez které si dnešní svět dokážeme jen těžko představit. Elektrická energie nám dává světlo, teplo, díky ní jsme schopni pohodlně cestovat i pracovat. Dříve byla její výroba spojena pouze s konvenčními primárními zdroji energie, jako je voda, uhlí, plyn, jádro. Produkce elektřiny byla poměrně laciná (záleželo na druhu výroby) a s postupem času se hlavně u uhelných elektráren stávala i ekologičtější. Což dříve nebylo a kyselá deště byly velmi častý jev.

V současné době je kladen důraz na co nejnižší produkci škodlivin vyjádřených v ekvivalentní míře oxidu uhličitého. To přináší značnou výhodou pro obnovitelné zdroje energie. Další výhodou je snižující se cena elektrotechnického křemíku a růst podpory ze strany jednotlivých států a významných světových organizací. Tím dochází k prudké výstavbě a rozvoji technologie jejich výroby. Pomalu, ale jistě se tak začíná měnit platforma zdrojů pokrývající denní diagram zatížení a z toho plynoucí plánování provozu přenosových a distribučních soustav.

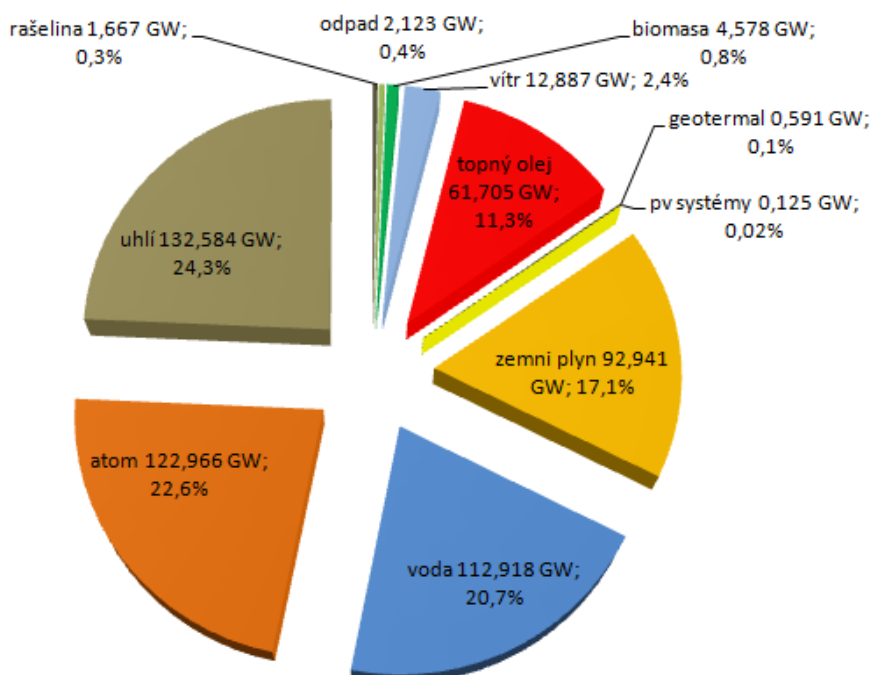
Samotná výroba elektřiny, či připojení výroby k distribuční síti, sebou nese řadu legislativních opatření včetně posouzení parametrů určujících kvalitu elektrické energie. Tato diplomová práce řeší jak problematiku obnovitelných zdrojů energie, tak úkony spojené s připojením výrobních jednotek k distribuční síti.

## 1 Obnovitelné zdroje energie (OZE)

S nutnou výrobou elektrické energie spojenou s obavou o vyčerpání fosilních paliv, s přihlédnutím na politicko-ekologické smýšlení světových státních organizací, je kladen důraz na výroby elektřiny, které budou v minimální míře představovat celosvětovou katastrofu spojenou se selháním lidského nebo přírodního faktoru a budou téměř nezávislé na palivech, které se někdy v budoucnu mohou dotěžit.

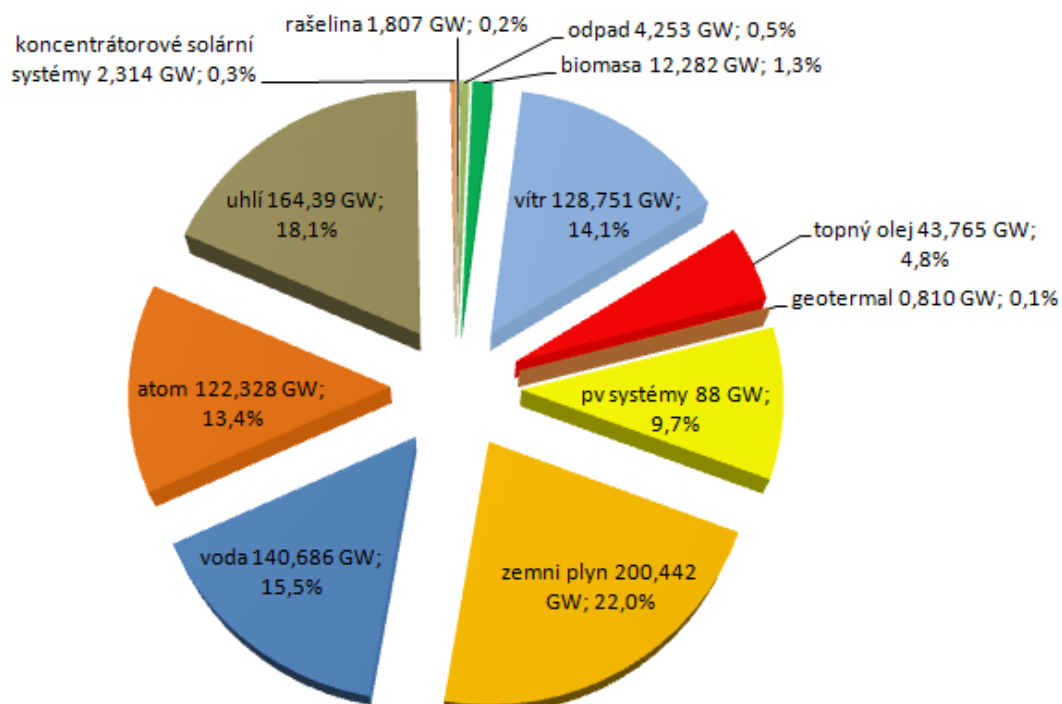
Na první pohled tuto podmínku splňují obnovitelné zdroje. Za obnovitelné zdroje, dle současné legislativy, jsou považovány obnovitelné nefosilní přírodní zdroje, jako je např. síla větru potřebná k roztočení generátoru větrné elektrárny, energie spektra slunečního záření, která se v solárním článku mění na elektrickou, energie vody pohánějící turbínu vodní elektrárny. Za další obnovitelné zdroje legislativa určuje biomasu, využití bioplynu, kalového plynu z chovných zvířat, a skládkového plynu [1]. Tyto zdroje jsou schopny sami sebe během postupné spotřeby částečně nebo plně obnovovat (s přispěním člověka nebo bez přispění). Jejich výhodou oproti konvenčním výrobnám na fosilní paliva je skutečnost, že nemusíme vyhledávat stále nová a nová ložiska a tím odpadají problémy spojené s těžbou, dodávkou a úpravou s uskladněním těchto těžných fosilních surovin. Teoreticky jsou obnovitelné zdroje schopny pokrýt celosvětovou spotřebu elektrické energie a řada světových organizací se touto problematikou zabývá. Jak ukazují následující grafy energetického mixu v Evropě z roku 2000 a 2014, podíl obnovitelných zdrojů na celkové produkci elektřiny výrazně stoupl.

### Podíl evropského energetického mixu v roce 2000



Graf 1 -1 Energetický mix 2000 [4]

### Podíl evropského energetického mixu v roce 2014



Graf 1 -1 Energetický mix 2014 [4]

### 1.1 Posouzení energetického využití OZE

Pro posouzení energetického potenciálu OZE je definováno několik charakteristických vlastností. Jako je instalovaný výkon

$$P_i \text{ (W)}$$

špičkový výkon

$$P_p \text{ (Wp)}$$

průměrný celoroční výkon

$$P_{cr} \text{ (kW)}$$

součinitel využití elektrárny v průběhu celého roku

$$K = \frac{W_R}{P_i \cdot 8760}$$

$W_R$  je celoroční energie vyprodukovaná za rok

8760 je počet hodin za 365 dní.

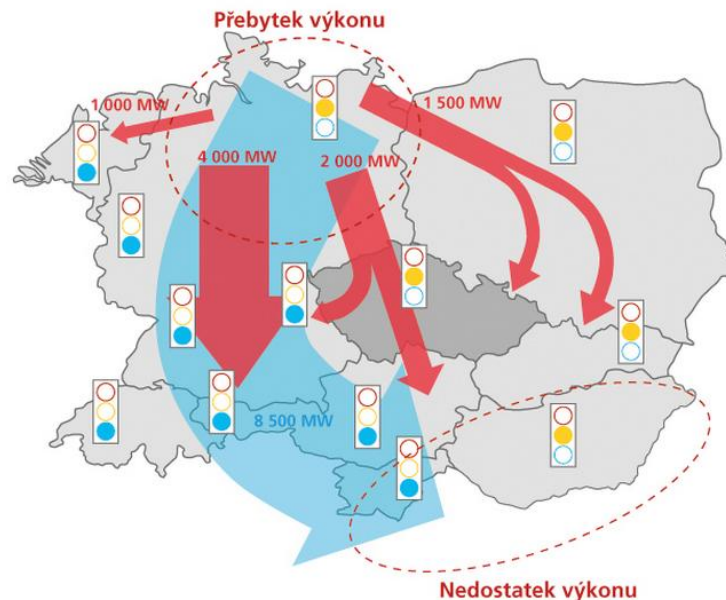
[1]

### 1.2 OZE a současná situace

Politika Evropské unie si klade za cíl zvýšit podíl výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů ve všech členských státech na minimálních 20 % a získat 10% spotřebu biopaliv z celkové spotřeby paliv v dopravě. To vše do roku 2020. Předpokládá, že díky tomu úměrně klesnou emise oxidu uhličitého také o 20 % a bude dosaženo 20% finančních úspor [6].

Jak plyne ze současné situace, výstavba obnovitelných zdrojů je hojně podporována, zapomíná se však na dimenzování a budování nových přenosových linek, které budou tento výkon odvádět ke spotřebitelům. Vážnost problému demonstruje současná výstavba blokových transformátorů (tzv. Phase Shift transformátor) na českém a polském území. Jejich úkolem je částečně omezit neplánovaný špičkový výkon ovlivněný počasím přenášený z německých OZE (fotovoltaika a větrné elektrárny) po české a polské přenosové soustavě, která by mohla vlivem přetížení zkolabovat. Podle mapky výkonových toků ze stránek firmy provozovatele přenosové soustavy

ČEPS by belgické, české a polské přenosové soustavě výrazně ulevilo, kdyby byla posílena německá přenosová soustava ze severu, kde je elektrické energie přebytek na jih Evropy, kde je jí nedostatek. Další nevýhodou je zálohovatelnost větrných a fotovoltaických elektráren jiným zdrojem, který není ovlivněný počasím jako obnovitelné zdroje [3].



Obr. 1.2 -1 Směr výkonových z Německých OZE (rok 2014) [3]

Výstavba OZE je primárně limitována zeměpisnou polohou a klimatem lokality. Proto se větrné elektrárny staví u pobřeží a tam, kde je vhodná síla větru, solární systémy jsou závislé na typu a velikosti intenzity slunečního záření. Dalšími kritérii rozhodování investorů o výstavbě OZE je politická stabilita prostředí, nutná investice a její návratnost, možnosti vyvedení výkonu do přenosové (distribuční) soustavy či rovnou ke spotřebitelí. Projekt Desertec, spuštěný v roce 2009, složený z 19 členů (světových firem, převážně německých), si kladl za cíl do roku 2050 vybudovat na severu Afriky, Blízkém východě a Evropě okolo 100 GW instalovaného výkonu ve větrných a solárních systémech s podporou biomasy a pomocí podmořských vysokonapěťových kabelů a propojené elektrizační sítě dopravit do Evropy výkon, který by mohl pokrýt okolo 15% evropské spotřeby elektrické energie. Projekt však nesl značnou technickou a finanční zátěž (odhadované náklady přes 400 miliard eur) spojenou s politickou nestabilitou v afrických částech země a prudkou výstavbou obnovitelných zdrojů v Evropě. Většina členů, proto projekt opustila a od roku 2014 má tři partnery (saúdskoarabská společnost ACWA Power, německý energetický

koncern RWE a čínský státní provozovatel přenosové soustavy SGCC). Prořídí skupina hodlá nabízet služby v oblastech severní Afriky a Blízkého východu. [5].



## 2 Druhy výroben elektřiny z OZE

Kapitola přináší přehled základních typů výroben elektrické energie z obnovitelných zdrojů (OZE) a princip výroby elektrické energie.

### 2.1 Solární systémy

Solární systémy, jak už napovídá název, fungují díky absorpci slunečního záření. Prakticky zde určujeme dva druhy výroben elektřiny, které se v současnosti používají. Mluvíme o tzv. Koncentrátorových solárních elektrárnách (KSE) a klasické fotovoltaice (FV).

#### 2.1.1 Koncentrátorové solární systémy (KSE)

Teoreticky KSE fungují na jednoduchém principu. Sluneční paprsky jsou parabolicky zakřivenými zrcadly koncentrovány na potrubí, v němž cirkuluje roztavený olej. Ten je ohříván na teplotu okolo 400 °C. Zahřátý olej ve výměníku předává energii vodě, kterou přemění na páru. Ta pohání turbínu a ta zas generátor. Tento systém vytvořený v Mohavské poušti v Kalifornii o instalovaném výkonu 354 MW dosahuje účinnosti 5 – 18 % v závislosti na ročním období.

Další možností je koncentrovat solární paprsky pomocí speciálně upravených a zakřivených zrcadel do jednoho ohniska. Toto ohnisko se nachází ve výšce přes sto metrů dlouhé věži. V ohnisku je teplota okolo 1000 °C a je zde ohřívána tavná sůl na teplotu přes 500 °C, která ve výměníku předává teplo vodě, která se změní v páru a ta pohání turbínu s generátorem. Tento systém je instalován ve Španělsku o instalovaném výkonu generátoru 19 MW. Elektrárna Gemasolar byla vystavěna v roce 2011 s účinností okolo 15 %. Náklady na výstavbu byly přes 230 milionu eur, což je při kurzu 25 Kč na euro 5,75 miliardy korun. Elektrárna zabírá plochu 1,85 km<sup>2</sup> a je schopna provozu 6 500 hodin v roce. Tavná sůl je schopna udržet svou teplotu i několik hodin. Dle španělské legislativy (z roku 2008) je nutné uskladnit energii odpovídající 4 hodinám plného provozu solárního pole. Jinak KSE není schopna regulace a nemůže být připojena do španělské elektrizační sítě.

Porovnáme pro zajímavost investiční náklady vztahované na megawatt u koncentrátorové solární elektrárny Gemasolar s předpokládanou cenou na dostavbu dvou nových bloků jaderné elektrárny Temelín, kdy 1 blok odpovídá 1 GW

elektrického výkonu a odhadovaná cena dostavby 300 miliard korun. Výpočtem jsme na 0,3 miliardy korun na megawattu instalovaného výkonu pro španělskou KSE při odhadnutém kurzu 25 korun za euro. Temelín by po dostavbě teoreticky vyšel na 0,15 miliardy korun [7], [8].

Problém s tímto systémem je v likvidaci ptactva. Ptáky koncentrované sluneční paprsky spalují zaživa, když létají pro hmyz, na který působí elektrárna jako magnet. V současné době ekologická hnutí bojují za nápravu [9].

### 2.1.2 Fotovoltaické elektrárny [1] [10]

Jedná se výrobní elektrické energie, které fungují na principu fotoelektrického jevu. Sluneční záření dopadá na fotovoltaický panel, který následně generuje elektrickou energii. Sluneční záření dopadající na fotovoltaický panel dělíme na přímé  $I_p$  a difúzní  $I_D$ . Difúzní záření  $I_D$  je rozptýl přímého záření  $I_p$  z odrazu o molekuly plynů, prachu, vodních par, mraků. Intenzita difúzního záření  $I_D$  vzrůstá se součinitelem znečištění  $Z$ .

Sluneční výkon dopadající z vesmíru na jednotkovou plochu mimo atmosféru je nazván sluneční konstantou o přibližné hodnotě  $I_0 = 1360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Hodnota skutečného slunečního výkonu dopadajícího na kolmou plochu solárních panelů vůči slunečním paprskům je snížena o součinitel znečištění  $Z$ , který je závislý na tlaku vzduchu a jeho znečištění. Hodnota součinitele znečištění  $Z$  je pro městské oblasti a průmyslová střediska rovna 4, pro venkov 3 a pro silně znečištěné prostředí větší než 5.

Výsledná intenzita přímého záření  $I_p$  dopadajícího pod úhlem  $\gamma$  na solární panel o ploše  $A$  je dána vztahem:

$$I_p = I_0 \cdot A^{-Z} \cdot \cos(\gamma) \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$$

Aby panel zachytil nejvíce energie ze slunečního záření, musí být správně skloněn. Optimální úhel položení panelu od vodorovné hladiny se mění podle ročního období a pohybuje se od  $15^\circ$  do  $45^\circ$  pro letní období. Pro zimní období se volí úhel sklonu panelu od vodorovné hladiny  $60^\circ$  až  $90^\circ$ . Fotovoltaická elektrárna může být doplněna o sledovače správného natočení panelů vůči dopadajícím slunečním paprskům. Sledovače mohou být jednoosé nebo dvouosé. Při návrhu fotovoltaické elektrárny se sledovači jsou kladeny vyšší nároky na prostor, aby nedocházelo v průběhu dne k zastínění části panelů sousedními panely. Při současné ceně křemíku pro výrobu fotovoltaických panelů, se proto finančně i výkonově vyplatí nestavět fotovoltaické elektrárny se sledovači, ale ušetřený prostor vyplnit dalšími fotovoltaickými panely.

Průměrná roční intenzita slunečního záření pro Českou republiku je okolo  $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  s průměrným ročním počtem 1 500 hodin slunečního svitu [1], [10]. Z těchto hodnot získáme okolo 1 200 kWh průměrné roční energie pohlcenou jedním metrem čtverečním solárního panelu, který je kolmo na dopadající záření. Pracuje – li solární

elektrárna s účinností 10 %, tak jsme na 120 KWh průměrné roční energie vygenerované z metru čtverečního solární elektrárny.

### **2.1.2.1 Druhy fotovoltaických elektráren**

Fotovoltaické elektrárny dělíme do tří systémů a to autonomní, hybridní a systémy přímo spojené se sítí bez akumulace. Solární elektrárnu tvoří fotovoltaické panely propojené do pole. To je spojeno s dobíjecím systémem akumulátorů a invertorů (obvykle s transformátorem), které vytvoří vhodné parametry elektrické energie pro připojené spotřebiče. Nesmí chybět měřicí, řídicí a jistící přístroje zajišťující spolehlivou výrobu elektřiny o definovaných parametrem a ochranu elektrárny proti indukovanému přepětí, či přímému úderu blesku.

Autonomní systém není napojen na přípojku distribuční soustavy. Solární elektrárna je tvořena solárními panely, které vyrábí proud v závislosti na intenzitě dopadajícího záření. Generovaný výkon z panelů pak může rovnou pohánět připojený spotřebič např. zavlažovací čerpadlo nebo systém na ohřev teplé vody. Další možností je propojit panely se zálohovacím systémem akumulátorů, které napájí spotřebiče při výpadku panelů. Možnosti výstavby autonomní elektrárny se nabízí do horských oblastí na chaty, kde je nevhodné zavádět elektrickou přípojku. Největší fotovoltaická autonomní elektrárna na světě je v Číně, v oblasti Nanji Island o instalovaném výkonu 1 MW<sub>p</sub>.

Hybridní systém je v základu autonomní systém fotovoltaické elektrárny doplněný nezávislým jiným zdrojem elektrické energie. Tím může být malá vodní elektrárna, větrný generátor, soustava motor generátor se spalovacím motorem nebo elektrická přípojka rozvodné sítě s konvenčními zdroji. Možnost využití hybridního systému solární elektrárny v kombinaci se zavedenou přípojkou využívá řada rodinných domů, kdy elektřinou generovanou z panelů lze ohřívat vodu pro domácnost, či pohánět jiné spotřebiče. Spousta majitelů rodinných domů v tomto směru podniká, protože se jim více vyplatí vyrábět si vlastní elektrickou energii, když svítí sluníčko, než brát elektřinu pouze z distribuční přípojky.

Solární elektrárny přímo připojené k rozvodné síti dodávají elektrickou energii do přípojky přes střídač s transformátorem. Můžou se používat i levnější střídače bez

transformátoru, což zvyšuje vliv parazitních kapacit fotovoltaického pole a následný svodový proud, který degraduje panely. Největší solární elektrárny připojované do distribuční sítě jsou stavěny o instalovaném výkonu desítek megawatt.

### **2.1.2.2 Princip funkce solárního článku**

Solární články jsou v podstatě srdcem solárního panelu a jsou řazeny do série. Vyrábějí se z polovodičového materiálu tak, aby po ozáření daným spektrem generovali v uzavřeném obvodu elektrický proud. A jak tedy fotovoltaický článek generuje napětí a v uzavřeném obvodu i proud? V první fázi valenční elektron musí pohltit záření ve formě fotonu o dostatečné energii, díky které se dostane z valenčního pásu přes energetickou bariéru zakázaného pásu (pro křemík je to energie odpovídající  $1,1 \text{ eV}$ ) do vodivostního pásu. Tím vznikne pár elektron díra. Aby nedocházelo k rekombinaci párů elektronů a děr, to znamená, aby se elektron nevrátil zpět do valenčního pásu, musí být přítomný vestavěný potenciál, který znemožní návrat elektronu z vodivostního pásu zpět do valenčního. Tento potenciál je dán technologií výroby solárního článku. Používají se metody založené na PN přechodu, struktury PIN a hetero přechody. Oddělené nosiče náboje (elektrony a díry) jsou následně odsávány ke spotřebiči, kde konají elektrickou práci.

### **2.1.2.3 Základní rozdělení solárních článků**

Solární články, které tvoří v praxi nejpoužívanější fotovoltaické panely, jsou články z krystalického křemíku. V laboratorních podmínkách dosahují ze všech fotovoltaických panelů nejvyšší účinnosti (až přes 20 %) a v roce 2013 tvořily přes 90 % z celkové produkce fotovoltaických panelů. Hodí se do oblastí s přímým zářením.

Další výrobní skupinou jsou tenkovrstvé články, které oproti panelům z krystalického křemíku nesou značné snížení výrobních materiálů. Zatímco u krystalických článků byla tloušťka základní křemíkové vrstvy přes  $150 \mu\text{m}$ , u tenkovrstvých technologií jsme na škále jednotek mikrometrů až stovek nanometrů. Výhodou tenkovrstvé technologie oproti článkům z krystalického křemíku je úspora výrobních materiálů, nevýhodou je nižší účinnost (od 8 do 12 % pro jednotlivé typy) při výrobě elektřiny a

rychlejší degradace vlivem svodových proudů, pokud v solární elektrárně na střídavý proud není použit inverter s transformátorem, který snižuje vliv parazitní svodové kapacity panelů. Zatímco u krystalických článků rozlišujeme multikrystalickou a monokrystalickou technologii, pro tenkovrstvé články se v současnosti používají tři výrobní technologie a to panely na bázi amorfního křemíku, články CIGS a CdTe. Použití tenkovrstvých solárních panelů se hodí do oblastí, kde převládá vyšší podíl difúzního záření.

Další kategorií solárních článků ve fázi vývoje jsou články s vícenásobnými profily k maximálnímu využití energie spektra dopadajícího slunečního záření. Zároveň jsou prováděny výzkumy na jiné metody separace nábojů, než jsou PN přechody, například využití nanostruktur a specifí kvantových jevů.

## 2.2 Výrobní elektřiny z biomasy

Pod pojem biomasa patří široká škála produktů, po jejichž technologicko-chemickém zpracování vznikne palivo vhodné pro energetické využití jako je doprava, vytápění a výroba elektrické energie. Do biomasy patří například rychle rostoucí dřeviny, dřevní odpady, olejnate rostliny, sláma zemědělských plodin, exkrementy a kejda hospodářských zvířat, kafilerní tuky a palivo z komunálního odpadu a skládkový plyn [1].

Obecně je výroba elektrické energie z biomasy spojena s dodávkou odpadního tepla do přilehlých budov a domácností. V České republice je zcela běžná situace, kdy se pod skládku nechají zavést vrty, přes které je zajištěn odvod skládkového plynu do kogenerační stanice, která do sítě produkuje elektrickou energii a do přilehlých vesnic či objektů teplo.

Další možností získání plynu k výrobě elektřiny a tepla je zplynování především odpadního dřeva z dřevozpracujícího průmyslu a rychle rostoucích dřevin, popř. obilovin. Lze využít i slepičího trusu a jiných forem biomasy organického původu. V podstatě se jedná o přeměnu méně energeticky využitelného paliva na více energeticky využitelné palivo. Dřevné produkty jsou předdrceny na malé kousky v řádu jednotek centimetrů, vysušeny na požadovanou vlhkost do 20 % a dávkovány do reakčního kotle (reaktoru). Zde dochází k chemickým a fyzikálním reakcím, jako je dosušení paliva, následuje pyrolýza, při které dochází k přeměně tuhého, energeticky méně využitelného paliva na energeticky lépe využitelný pyrolýzní plyn. Plyn je produkován za nedostatku vzduchu, při teplotě v rozmezí 400 °C až 700 °C s produkcí vedlejší pevné složky s vysokým podílem uhlíku (dřevěného uhlí). Dalšími produkty jsou odpadní látky, jako je například dehet a odpadní voda. Pyrolýzní plyn na výstupu reaktoru má teplotu okolo 400 °C a je jím poháněna plynová turbína elektrárny, popřípadě je palivem spalovacího motoru, který pohání generátor [1], [13].

Druhou možností zplynování je chemická přeměna paliva za pomoci zplyňovacího média (jako je vzduch, kyslík, vodní pára). Teplota reakce, kdy vzniká plyn je mezi 700 °C až 1100°C. Výhodou tvorby plynu za vyšších teplot je, že roste podíl vodíku a klesá podíl vzniku CO<sub>2</sub> a dehtu. Tím je plyn kvalitnější, což má příznivý dopad na životní prostředí. Výstupní plyn pohání plynovou turbínu elektrárny a ve

výměníku jím lze ohřívat jiné médium jako je voda popř. pára, kterou lze opět energeticky využít [1], [13].

Výrobní elektrické energie pracující na základě zplynování organického odpadu (sláma, dřevní odpady, exkrementy hospodářských zvířat...) jsou častým jevem na malých městech a vesnicích. Ty jsou pak zpravidla energeticky soběstačné a závislé jen na svozu biomasy od dodavatelů. Nevýhodou je, že tento systém výroby elektřiny z organického odpadu nelze uplatnit u více vesnic v blízké lokalitě, protože tolik organického odpadu prostě není. Pro představu, elektrárna založená na zplynování a následném spalování plynů z biomasy na Trutnovsku má instalovaný elektrický výkon 4,9 MW (maximální výkon generátoru je 5,4 MW) s investičními náklady okolo půl miliardy korun. V parním fluidním kotli o instalovaném výkonu 17,2 MW s maximálním výkonem 20 MW může být zplyňována a následně spalována široká škála biomasy od zemědělských meziproductů jako je sláma po dřevní štěpku, popř. vysušené kaly z čistíren odpadních vod nebo chovných zvířat [11]. Také čističky odpadních vod jsou schopny do sítě produkovat určité množství elektrické energie. Jako primární palivo je použit odpadní kal znečištěné vody. Ten je vysušen a v reaktoru přeměněn na plyn, který může být použit do spalovacích motorů pohánějící generátor.

Nevýhodou účelového pěstování biomasy typu rychle rostoucích dřevin je fakt, že z osazené plochy jsme schopni získat po sklizni a následného technologického zpracování dřeviny více než osmkrát menší elektrickou energii, než kdyby byla daná plocha osázena fotovoltaikou. Výhodou elektráren na biomasu oproti ostatním typům výroben elektrické energie z obnovitelných zdrojů je velice malá závislost výroby elektřiny na počasí a tím pádem snadná říditelnost dodávaného výkonu do sítě. Při srovnání pořizovacích nákladů elektrárny na biomasu a na fotovoltaiku, vychází v současné době 25 milionů korun na jeden MWp instalovaného výkonu fotovoltaické elektrárny [10] a 100 milionů korun na jeden MW instalovaného výkonu elektrárny na biomasu [11].

Výroba elektrické energie z uhelných elektráren je často z ekologicko ekonomických důvodů podporována spalováním biomasy. Snad největším vlastníkem kogeneračních jednotek založených na kombinaci spalování biomasy a uhlí je ČEZ. Jako příklad lze jmenovat elektrárny Tisová, Poříčí a Hodonín. Proč tyto elektrárny



nejedou na samostatnou biomasu bez podpory uhlí lze zdůvodnit nedostatkem biomasy, jejíž účelové pěstování pro tak vysoké výkony turbín a produkce tepelné energie by pravděpodobně bylo ekologicky, ekonomicky a prostorově nereálné. Elektrárna Hodonín má vlastní blok na spalování biomasy o instalovaném elektrickém výkonu 30 MW a denně si vyžádá 1200 tun biomasy [12].

### 2.3 Větrné elektrárny [1]

Vítr je přírodní zdroj energie vytvářený tlakovým spádem. V podstatě je vítr vzduch, proudící z tlakové níže do tlakové výše, vyvolané nerovnoměrným ohřevem zemského povrchu od slunečního záření, rotací země, střídáním dne s nocí a dalšími přírodními jevy. Rychlost větru směrem k povrchu klesá a je ovlivněna reliéfem a uměle vytvořenými překážkami jako jsou budovy.

Pro rovinný povrch platí vztah

$$v^* = v_0^* \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^n \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

kde  $v^*$  je průměrná rychlost větru ve výšce  $h$  nad zemským povrchem a  $v_0^*$  je průměrná rychlost větru ve výšce  $h_0$  nad zemským povrchem. Číslo  $n$  určuje drsnost povrchu. Například pro hladký reliéf (vodní hladina, písek), drsnost povrchu  $n$  odpovídá hodnotě 0,14 a značí se písmenem a. Pro vesnice a malá města odpovídá 0,48 a značí se písmenem f [1].

Pro snadnější výpočet rychlosti větru počítáme průměrnou rychlost větru  $v^*$  v referenční výšce  $h_{10}$  10 metrů nad zemským povrchem, které odpovídá rychlost větru  $v_{10}^*$ . Zavádíme korekční součinitel  $k_h$  a výsledná průměrná rychlost  $v_h^*$  ve výšce  $h$  má tvar

$$v^* = v_{10}^* \cdot k_h \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

kde korekční součinitel  $k_h$  odečteme z tabulek pro jednotlivé typy reliéfů.

Výška h (m)	Typ povrchu					
	a	b	c	d	e	f
5	0,91	0,9	0,88	0,86	0,82	0,72
10	1	1	1	1	1	1
20	1,1	1,12	1,13	1,16	1,21	1,39
30	1,17	1,19	1,22	1,26	1,36	1,69
40	1,21	1,25	1,28	1,34	1,47	1,95
50	1,25	1,29	1,34	1,4	1,57	2,17

Tab. 2.3 -1 Hodnoty korekčního součinitele  $k_h$  [1]

Kde a značí hladký povrch, b značí ornici, c značí nízké obilné porosity jako je třeba ječmen, d značí vysoké porosity jako je třeba kukuřice, e značí lesy a f značí vesnice a malá města.

Jak vidíme z uvedené tabulky hodnot korekčního součinitele  $k_h$ , čím drsnější povrch, tím roste  $k_h$ .

Za uměle vytvořenými překážkami jako jsou budovy, rychlost větru klesá. Mění se jeho směr, což vede k tvorbě větrných vírů a to vede ke zbytečnému namáhání větrných rotorů instalovaných u těchto překážek. Proto se větrné elektrárny staví v bezpečné vzdálenosti od možného výskytu těchto turbulentních vírů.

Výkon větru  $P_v$  lze vyjádřit z jeho energie  $E_v$

$$E_v = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \text{ (J)}$$

kde  $v$  je rychlost pohybující se hmoty větru  $m$ .

Hmotu větru  $m$  lze přepsat do vztahu

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot s \text{ (kg)}$$

kde  $\rho$  je hustota vzduchu,  $V$  je objem vzduchu,  $A$  je plocha, kterou daný objem vzduchu protéká a  $s$  je dráha, kterou urazí.

Pro výkon větru  $P_v$  protékajícího jednotkovou plochou  $1\text{m}^2$  pak platí

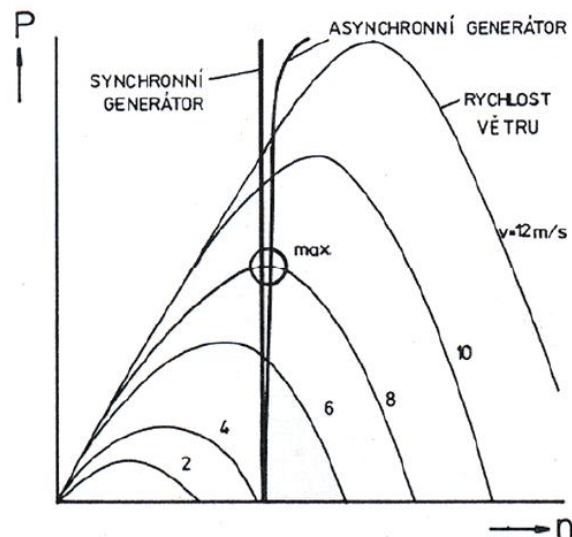
$$P_v = \frac{E_v}{A \cdot t} = \frac{1}{2} \rho \cdot \frac{A \cdot s}{A \cdot t} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$$

### 2.3.1 Princip činnosti větrné elektrárny

Na listy větrného rotoru působí energie větru. Ta je při určité hodnotě rychlosti větru schopna rotor uvést v pohyb. Větrný rotor následně roztáčí generátor, který produkuje střídavý proud. Napětí ze synchronního generátoru je usměrněno a znovu rozstředáno na požadovanou kvalitu danou normou. Větrný rotor a synchronní generátor bývají konstruovány se společnou hřídelí bez převodovky. Proud z asynchronního generátoru je napřímou dodáván přes blokové trafo do distribuční sítě. Parametry frekvence a napětí v pilotních uzlech soustavy bývají tvrdé, a proto

jsou tvrdé i parametry frekvence a napětí asynchronního generátoru. Větrný rotor s asynchronním generátorem pracuje s převodovkou. Protože asynchronní generátor odebírá ze sítě jalový proud vznikající při magnetizaci generátoru, je nutná jeho kompenzace pomocí paralelně připojených kondenzátorů k větrné elektrárně. Otáčky větrných rotorů požadujeme konstantní i při různých rychlostech větru.

Nejvyšší elektrický výkon je dosahován při rychlostech větru okolo patnácti metrů za sekundu. Naopak minimální rychlost větru pro výrobu elektrické energie je v rozmezí třech až pěti metrů za sekundu. K odstavení elektrárny dochází při rychlostech větru přesahující dvacet pět metrů za sekundu. A samotná elektrárna musí vydržet rychlost větru šedesáti metrů za sekundu.



Graf 2.3.1 -1 Závislost výkonu  $P$  na otáčkách  $n$  při různých rychlostech větru [1]

Až na výrobní jednotky malých výkonů do 1,5 kW jsou větrné rotory pomaluběžné. Například pracovní otáčky rotorů větrných elektráren instalovaných na Vysočině u obce Věžnice se pohybují v rozmezí od sedmi do šestnácti otáček za minutu. K regulaci otáček větrného rotoru se užívají regulační principy založené na natáčení rotorových listů (regulace PITCH) do směru větru tak, aby v případě vysokých rychlostí větru nedocházelo k přetěžování hřídele. V případě větrných rotorů s pevně kotvenými lopatkami je regulace (STALL) zajištěna jejich speciálním proměnným

tvarem, který při nárůstu rychlosti větru postupně odtrhává větrné proudy od lopatek, tím se z větru převádí na rotor jen taková část energie, která nezpůsobí destruktivní účinky na hřídeli a zároveň bude schopna roztáčet generátor. Nevýhodou regulace STALL je, že rotor není schopen samostatného rozběhu. Ten se musí provádět elektrickým motorem [1], [15].

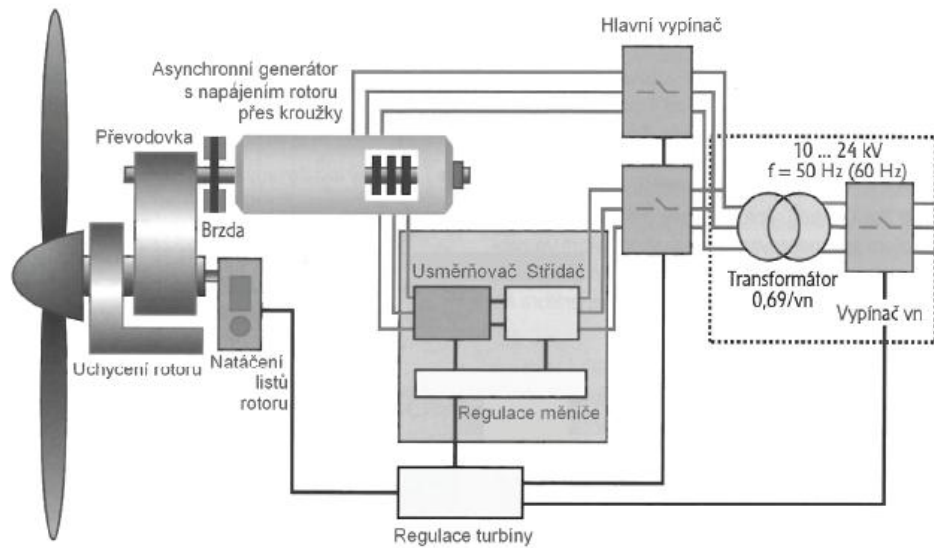
### **2.3.2 Generátory větrných elektráren**

K produkci proudu z větrných elektráren se používá několik typů generátorů.

Pro malé elektrárny o výkonu do 10 kW se používají více pólové synchronní generátory s permanentními magnety. Tyto elektrárny mohou být součástí hybridní ostrovní sítě spolu s dalšími obnovitelnými zdroji.

Pro střední a velké výkony jsou používány asynchronní generátory a to buď s kotvou nakrátko, nebo s napájeným rotorovým vinutím. Generátory s kotvou nakrátko mají menší regulační schopnost otáček, a proto se používají stroje s možným přepínáním počtu pólů. Generátory s kotvou nakrátko jsou používány do výkonu cca 300 kW a k síti se připojují přes tyristorový spouštěč kvůli omezení proudových rázů během připojení. Tyristorový spouštěč je následně překlenut a generátor je připojen bez něho k distribuční síti. Nevýhodou asynchronních generátorů je nutnost kompenzace jalového výkonu. Proto se po připojení asynchronního generátoru k distribuční síti připojuje i kompenzační kondenzátor.

Asynchronní generátory s napájeným rotorem umožňují provoz při nižších otáčkách větrné turbíny, takže lze k výrobě proudu využít i menší rychlosti větru než u generátoru s kotvou nakrátko. Na vinutí speciálně upraveného rotoru je přes kroužky připojen měnič, který na rotoru udržuje takový průběh napětí a proudu, aby byl zajištěn požadovaný skluz mezi točivým elektromagnetickým polem rotoru a statoru generátoru. Neboť skluz určuje velikost proudu vznikajícího ve statorovém vinutí generátoru. Proud je následně přes blokový transformátor předáván zátěži do distribuční sítě [1].

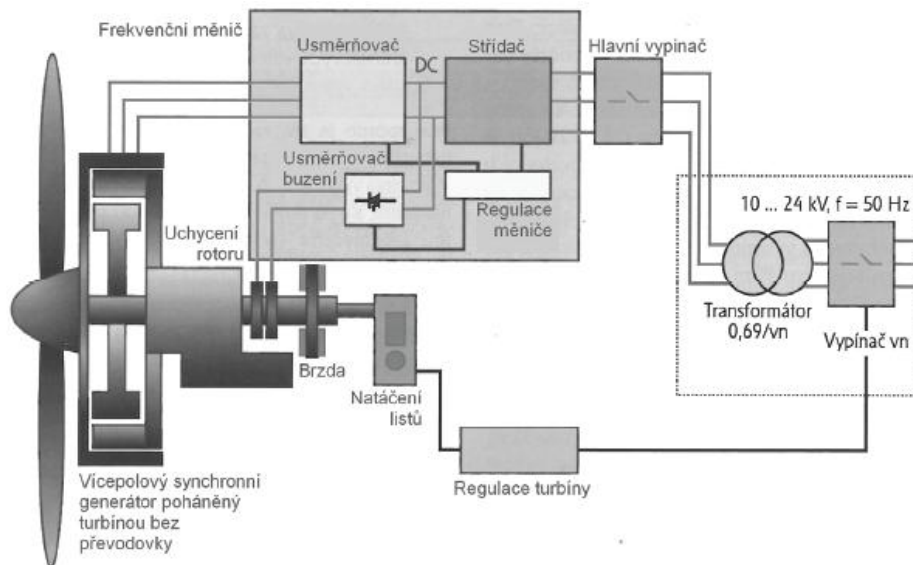


Obr 2.3.2. Asynchronní generátor s napájeným rotorem [1]

Větrné elektrárny instalované ve Věžnici na Vysočině mají asynchronní generátory o instalovaném výkonu přes 2 MW na jednu elektrárnu s rozsahem otáček od 900 do 1800 otáček za minutu a sdruženým napětím na svorkách statoru 690 V [14].

Asynchronní generátory jsou s větrným motorem spojeny přes převodovku, která jim zajišťuje konstantní otáčky nezávislé na změně otáček větrného motoru.

Pro elektrárny nejvyšších výkonů se užívají pomaluběžné synchronní generátory, obvykle spojené spolu na jedné hřídeli s větrným motorem. Otáčky synchronního generátoru jsou pak úměrné otáčkám větrného motoru. Generovaný proud je následně usměrněn a poté nastřídán na kvalitu určující normy a dodáván do distribuční sítě [1].



Obr. 2.3.2 -2 Synchronní generátor ve větrné elektrárně [1]

## 2.4 Vodní elektrárny

V České republice vodní elektrárny představují poměrně spolehlivý zdroj elektrické energie, který je schopen velmi rychle reagovat na potřeby distribuční soustavy. Využívají se zejména k pokrytí výkonu v období špičkové spotřeby s možností najetí na jmenovitý výkon do dvou minut nebo jsou součástí záložních systémů při možném blackoutu velkých elektráren. Dohromady je instalováno přes 2 GW výkonu ve vodních elektrárnách na území České republiky. Jen pro srovnání instalovaný výkon dvou bloků jaderné elektrárny Temelín je také přes 2 GW elektrického výkonu.

### 2.4.1 Princip a druhy vodních elektráren

Princip výroby elektřiny je následující. Přívodním kanálem na vodní turbínu dopadá voda. Síla dopadající vody na lopatky roztáčí hřídel turbíny, na které je umístěn i generátor, který vyrábí elektrickou energii. Ta je v určité kvalitě přes blokové trafo dodávána do distribuční sítě a část spotřebována vlastními spotřebiči elektrárny.

Výkon turbíny je dán vztahem

$$P_t = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \cdot \eta_t$$

kde  $\rho$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) je hustota vody,  $Q$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) je průtok vody,  $g$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) je gravitační zrychlení,  $H$  (m) je využitelný spád,  $\eta_t$  je celková účinnost turbíny respektující ztrátu

objemového množství přivedené vody, hydraulické a mechanické ztráty. Běžně užívané turbíny vodních elektráren dosahují účinnosti 0,8 až 0,9.

Podle ročního využití instalovaného výkonu dělíme elektrárny na průtočné (4000 až 6500 hodin), akumulární (1500 až 3000 hodin) a přečerpávací (1000 až 1500 hodin) [16].

Největší přečerpávací elektrárna v České republice jsou Dlouhé Stráně s největší reverzní turbínou v Evropě. Instalovaný výkon Francisových reverzačních turbín je 2 x 325 MW s největším spádem v České republice 510 metrů. Objem horní nádrže má objem okolo 2,7 milionu kubíků vody a spodní nádrž okolo 3,4 milionu kubíků vody. Elektrárna je řešena jako podzemní dílo a velice pozitivně zapadá do tamního ekosystému. Voda z horní nádrže k podzemní elektrárně je přiváděna dvěma přivaděči, každý pro jednu turbínu. Přivaděče mají délku okolo 1 500 metrů. Elektrárnu s dolní nádrží spojují dva odpadní tunely o průměru přes 5 metrů a délce přes 350 metrů. Přenos vyrobené elektrické energie do přenosové soustavy zajišťují dva blokové transformátory 22 kV umístěné v podzemní elektrárně a další dva 400kV transformátory umístěné na povrchu [17].

Průtočné elektrárny pracují bez akumulace objemu vody, kdy část toku řeky je svedena přes přivaděče na vodní turbínu.

Akumulační elektrárny jsou tvořeny hrází či přehradou, která hromadí přitékající vodu z řek k dosažení větší masy vody přiváděné na turbínu.

Významným zdrojem elektrického výkonu pro Česko je Vltavská kaskáda. Jedná se o kombinaci akumulárních a průtočných elektráren využívající hydroenergetický potenciál Vltavy. Mimo celkové sumy instalovaného výkonu jednotlivých elektráren, který je přes 750 MW, jsou přehradní nádrže díky schopnosti regulovaného odtoku vody významným pomocníkem v boji proti povodním. Elektrárny Vltavské kaskády jsou uvedeny v následující tabulce

Lokace	typ VE	typ turbíny	Instalovaný výkon
Lipno I	akumulační	Francis	2 x 60 MW
Lipno II	průtočná	Kaplan	1,5 MW
Orlík	akumulační	Kaplan	4 x 91 MW
Kamýk	akumulační	Kaplan	4 x 10 MW
Slapy	akumulační	Kaplan	3 x 48 MW



Štěchovice I	akumulační	Kaplan	2 x 11,25 MW
Štěchovice II	reverzní	Francis	45 MW
Vrané	akumulační	Kaplan	2 x 6,94 MW
Modřany	průtočná	Kaplan	3 x 0,55 MW
Štvanice	průtočná	Kaplan	3 x 1,89 MW

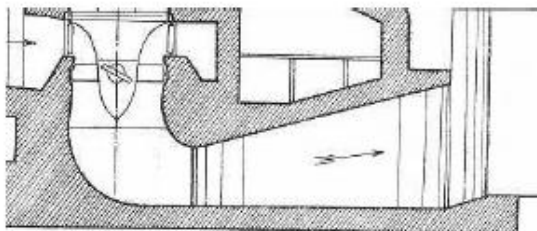
Tab. 2.4.1 -1 Vltavská kaskáda [18] [20] [21] [23]

### 2.4.2 Základní druhy vodních turbín [16]

Podle přeměny vodní energie dopadající na lopatky dělíme turbíny na rovnotlaké a reakční.

U reakční turbíny voda vstupuje do nerotujících rozváděcích lopatek u Francisovy turbíny nebo kanálků u Kaplanovy turbíny. Zde se mění potenciální energie vody na kinetickou, voda vstupuje do opačně zakřivených rotujících oběžných lopatek a zároveň je poháněna. Vlivem savky vzniká před a za oběžnými lopatkami tlakový spád, který postupně zvyšuje (relativní) rychlost vody, která tak předává více kinetické energie oběžným lopatkám ve srovnání bez použití savky. Vlivem předání kinetické energie rotujícím lopatkám se (absolutní) rychlost výtokové vody opouštějící lopatky sníží. Výhodou reakčních turbín je zužitkování spádu od oběžného kola k vývařišti, který rovnotlaké turbíny nevyužijí.

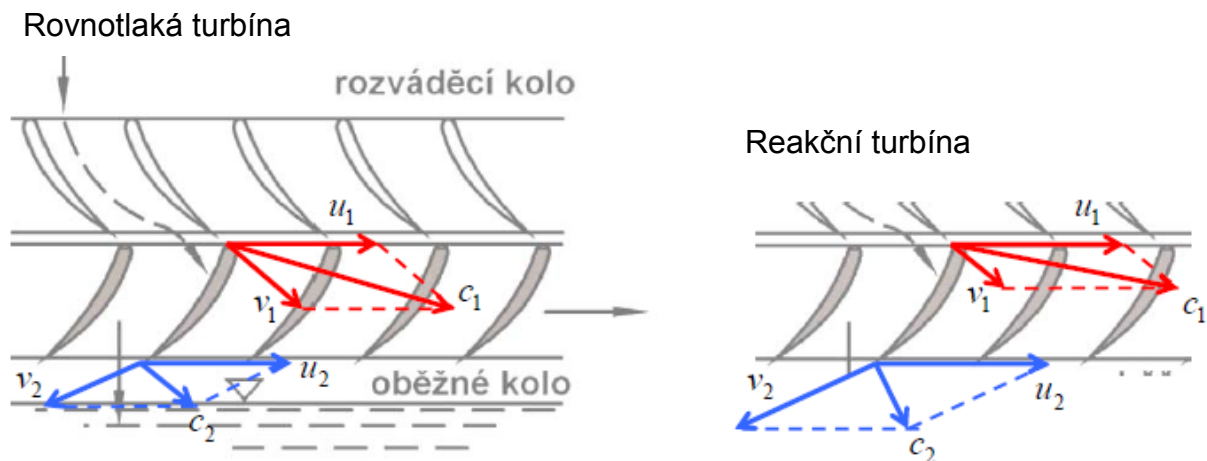
Savka je kuželovitě vytvořené potrubí vedoucí pod vývařištem přetlakových turbín. Na spodních částech lopatek oběžného kola vytváří podtlak zvyšující (relativní) rychlost vody pohánějící turbínu, která tak předá více kinetické energie rotujícím lopatkám. Zároveň je využit výškový rozdíl mezi přetlakovou turbínou a vývařištem, který rovnotlaké turbíny nevyužijí.



obr. 2.4.2 -1 savka a reakční turbína [16]

U rovnotlaké turbíny je voda přiváděna do rozváděcího zařízení, kde se mění potenciální energie vody na kinetickou a odkud vstupuje proud vody na oběžné

lopatky turbíny ve vhodném směru. Voda vtéká do oběžného kola za atmosférického tlaku a na rozdíl od reakčních turbín je tlak před a za oběžnými lopatkami turbíny konstantní. Tím je konstantní i (relativní) rychlost vody působící na oběžné lopatky turbíny. Voda předá značnou část své kinetické energie rotujícím lopatkám, které opouští se zbytkovou menší rychlostí. Nevýhodou rovnotlakých turbín je nevyužití spádu od oběžného kola k vývařišti.

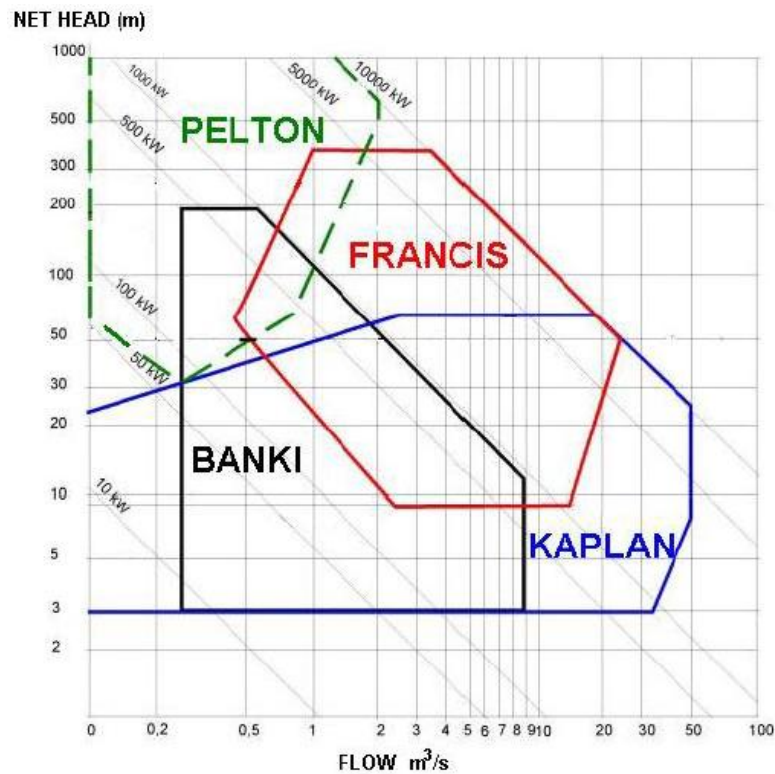


Obr. 2.4.2 -2 Princip rovnotlaké a reakční turbíny s porovnáním rychlostních složek [16]

index 1 značí vtokové veličiny, index 2 značí výtokové veličiny,  $c$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) je absolutní rychlost vody,  $v$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) je relativní rychlost vody (relativní = vzhledem k poloze rotoru) a  $u$  ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) je obvodová rychlost rotoru

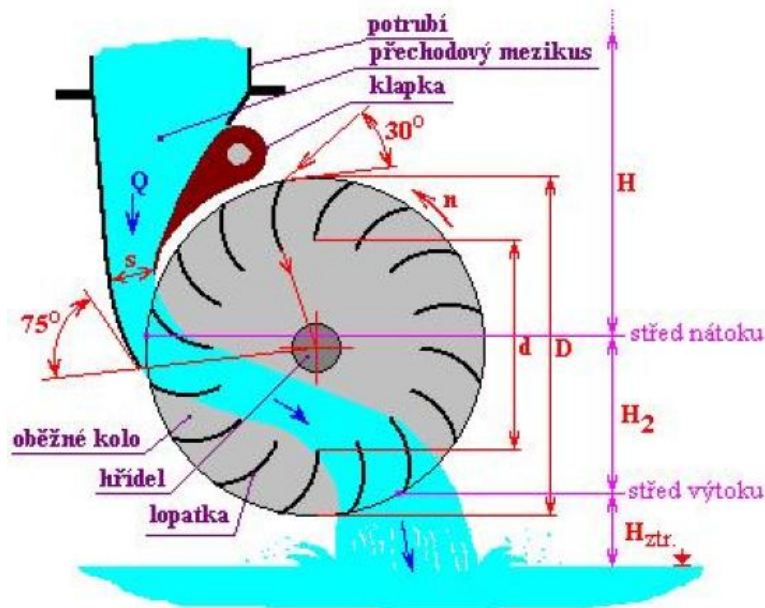
### 2.4.2.1 Bánkiho turbína

Je rovnotlaká turbína vhodná pro malé průtoky a malé až středně velké spády. Z níže uvedeného Q-H diagramu vidíme průtok Bánkiho turbíny od pár set litrů za sekundu do deseti kubíků za sekundu. Využití spádu od cca tří metrů do cca dvou set metrů s provozním zatížením do cca 1 MW. Q-H charakteristiky turbín udává výrobce a u každého se mohou lišit. Takže se může lišit i rozsah využitelných spádů, průtoků a tím i výkonů. Bánkiho turbína se obecně hodí pro malé průtoky a malé až středně velké spády.



Obr. 2.4.2.1 -1 Příklad Q-H charakteristiky turbín [16]

Voda je k turbíně přiváděna kruhovým potrubím, které je na konci pomocí muzikusu převedeno do obdélníkového tvaru s klapkou regulující průtok vody, který roztáčí turbínu. Předání energie vody lopatkám dochází ze dvou průtoků ve dvou místech oběžného kola. Při první průtoku voda předá okolo 79 % z celkového výkonu turbíny a při druhém asi 21 %.



Obr. 2.4.2.1 -2 Princip Bánkiho turbíny [16]

Plně je využitelný spád  $H$ , částečně i  $H_2$ . Výškový rozdíl  $H_{ztr.}$  mezi vývařišťem a středem výtoku u oběžného kola je spád energeticky nevyužitelný.

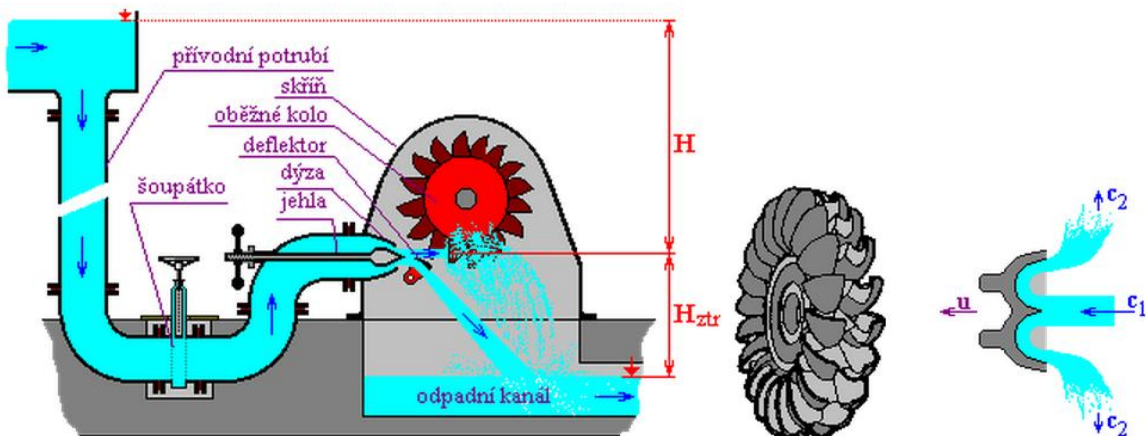
### 2.4.2.2 Peltonova turbína

Na stránkách výrobce ČKD Blansko Holding, a.s. je uváděn rozsah využití jeho Peltonových turbín od sedmdesáti metrů spádu do 1,2 km spádu, s rozsahem průtoku od  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  do cca  $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a rozsahem výkonu od 0,3 MW do 350 MW. Hodí se tedy pro velké spády s menším množstvím vody.

Peltonova turbína je rovnotlaká. Voda je k oběžným lopatkám přivedena potrubím kruhového průřezu. To vede k jedné nebo více dýzám, které pouští vodu v přesném směru na hranu umístěnou ve středu lžícovitých lopatek rotující turbíny. Speciální lžícovitý tvar lopatek a přesný souběh rychlosti vody tekoucí po lopatce s rychlostí rotoru způsobí energeticky velice účinné předání energie vody turbíně, kdy voda opouští lopatky s minimální výtakovou rychlostí. Účinnost u malých turbín tohoto typu se pohybuje nad 80 %, pro velké turbíny okolo 95 %.



Obr. 2.4.2.2 -1 Q-H charakteristika výrobce Peltonovy turbíny [22]



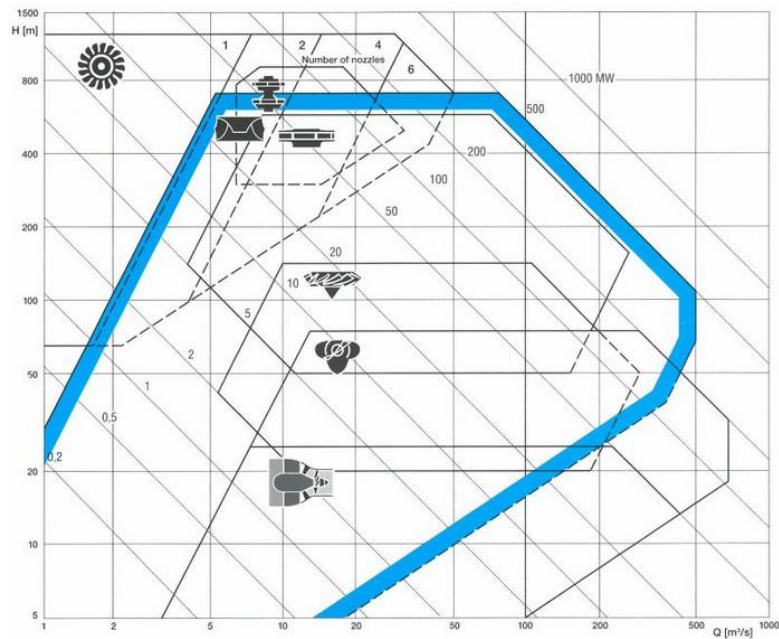
Obr. 2.4.2.2 -2 Princip Peltonovy turbíny [22]

### 2.4.2.3 Francisova turbína

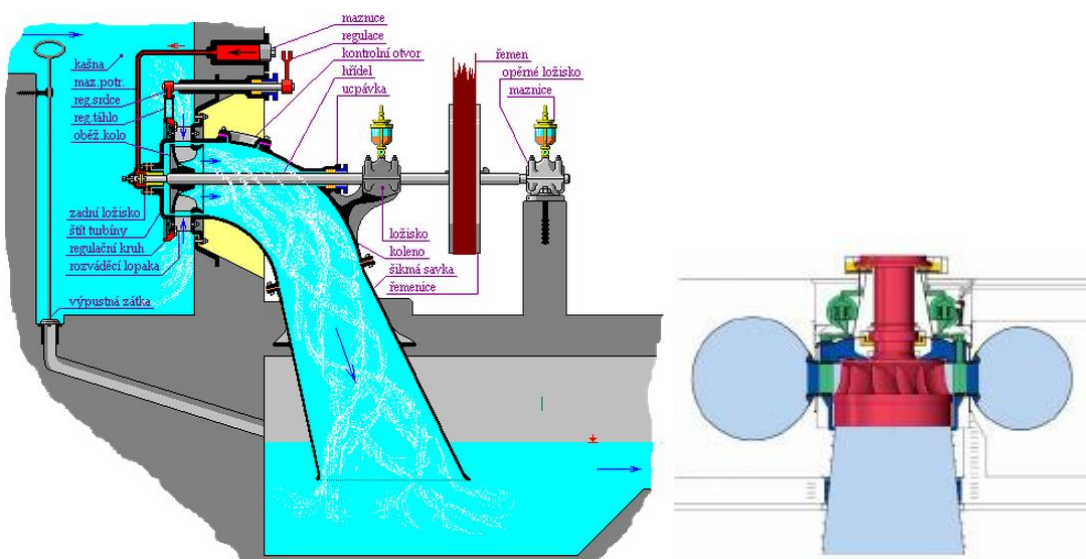
Francisova turbína je reakční turbína, která díky savce využívá i spád pod oběžným kolem turbíny. Běžně se užívá v přečerpávacích vodních elektrárnách (PVE). Na stránkách výrobce ČKD Blansko Holding, a.s. je uváděn spád od 10 m do 700 m. Hraniční průtok podle Q-H diagramu výrobce je  $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Rozsah výkonu, ve kterém turbína pracuje, uvádí výrobce 0,2 MW až 500 MW. Z uvedených údajů plyne,

že se hodí pro velké průtoky i spády, ze kterých generuje i velké výkony. Účinnost těchto turbín je mezi 75 % až 90 %.

Samotná turbína je buď ve vertikálním, nebo horizontálním umístění. Voda vniká do regulovatelných rozváděcích lopatek po celém obvodu turbíny. Odtud je přiváděna do oběžných lopatek, kde je pomocí savky urychlována a kde mění svou kinetickou energii na rotační energii turbíny.



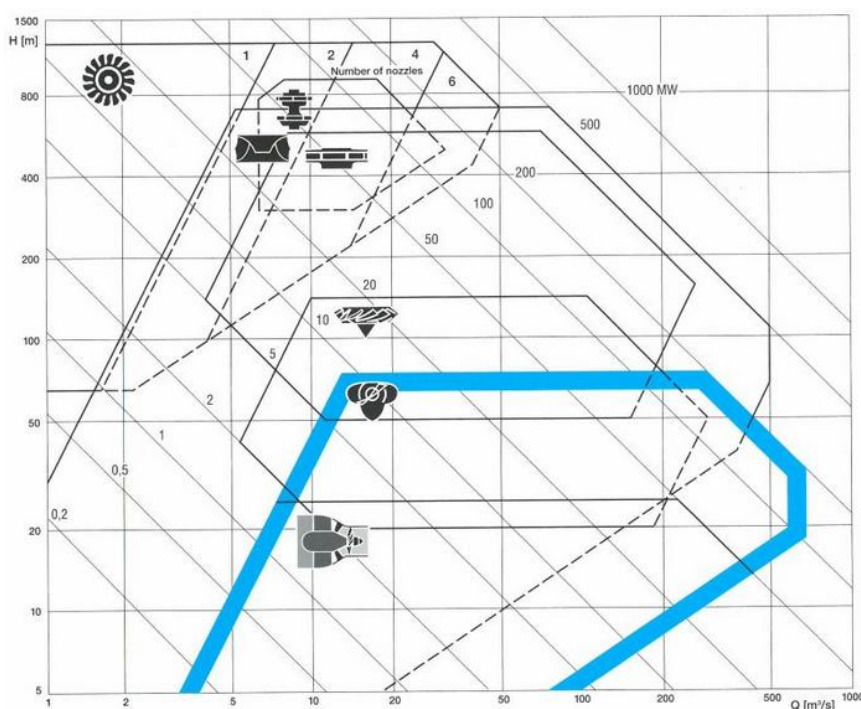
Obr. 2.4.2.3 -3 Q-H charakteristika Francisovy turbíny [22]



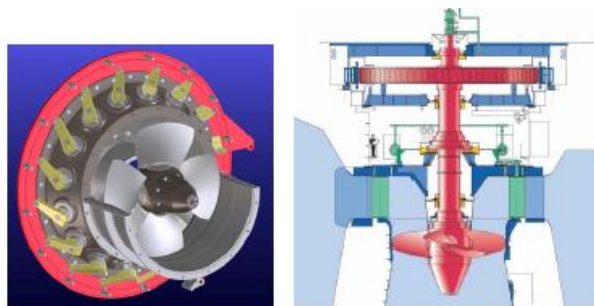
Obr. 2.4.2.3 -4 Způsoby umístění Francisovy turbíny [22]

### 2.4.2.4 Kaplanova turbína

Tvarem připomíná lodní šroub. Hodí se pro velké průtoky s malými spády. Na stránkách výrobce ČKD Blansko Holding, a.s. je uváděn vhodný spád turbíny od 1,5 m do 85 m s výkonem od 0,2 MW do 200 MW. Podle Q-H diagramu je rozsah průtoku od cca 4 do cca 550 m<sup>3</sup> · s<sup>-1</sup>. Průměr oběžného kola vyrábí od 0,5 m do 10 m se třemi až osmi oběžnými lopatkami. Kaplanova turbína je vylepšením Francisovy turbíny. Umožňuje regulaci natáčení přívodních kanálků i oběžných lopatek. To zvyšuje účinnost až na 95 %. Vlivem velké regulační schopnosti turbíny je vhodná pro proměnlivé průtoky.



Obr. 2.4.2.4 -1 Q-H diagram Kaplanovy turbíny [22]



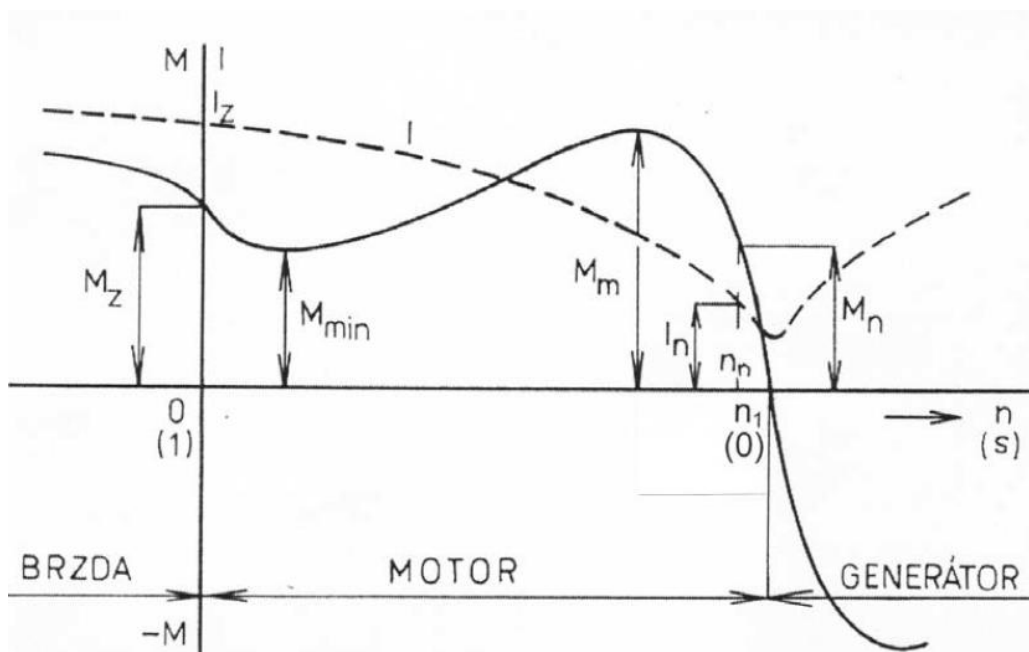
Obr. 2.4.2.4 -2 Kaplanova turbína [16]

### 2.4.3 Generátory vodních elektráren

Běžně se používají asynchronní a synchronní generátory.

#### 2.4.3.1 Asynchronní generátor [24] [25]

Asynchronní generátor je využíván u malých průtočných elektráren. Používá se klasický asynchronní motor s kotvou nakrátko, který po připojení a rozběhu z distribuční trojfázové sítě je schopen přejít do generátorového režimu a do sítě dodávat elektrickou energii v odpovídající kvalitě. U připojení je rotor asynchronního stroje roztočen vodní turbínou na otáčky velmi blízké synchronním otáčkám sítě a následně k trojfázové distribuční síti připojen. Proudový ráz vzniklý při připojení je proto značně omezen a asynchronní stroj se také rychleji dostane do generátorového režimu.



Obr. 2.4.3.1 -1 Pracovní režimy asynchronního stroje s momentovou a proudovou charakteristikou [24]

Nebezpečný jev pro asynchronní generátor je výpadek distribuční sítě. Nejen, že vlivem indukčnosti statorového vinutí a prudké změně magnetického pole dojde k přepětí na svorkách statoru, ale asynchronní stroj v nadsynchronních otáčkách může dosáhnout nebezpečně vysokých otáček vlivem odlehčení rotoru. Rotor byl totiž před výpadkem zatěžován magnetickým tokem generovaných proudů ve statoru působícím proti magnetickému toku generovaného z proudů v rotoru. Jakmile dojde



k zániku magnetického toku ve statoru vlivem výpadku distribuční sítě, dojde k zániku magnetického toku i v rotoru. Rotoru tedy nebrání žádná síla v otáčkách, naopak je mnohem rychleji urychlován vodní turbínou a otáčky mohou v nebezpečně krátkém časovém okamžiku nekontrolovatelně stoupnout za bezpečnou mez. Z tohoto důvodu se neužívají rychle otáčkové dvojpólové stroje, ale více pólové například čtyř až osmi pólové, které jsou na trhu hojně dostupné a jsou schopny samy sebe vlastní ventilací uchládit. Důležitým faktem je, aby asynchronní generátor pracoval při jmenovitých hodnotách otáček a výkonu, kdy má nejvyšší účinnost. Toho lze dosáhnout vhodným převodovým poměrem. Asynchronní generátor při svém chodu do sítě dodává činný proud, který je úměrný skluzu statorového magnetického pole za rotorovým magnetickým polem, a odebírá ze sítě jalový proud. Proto je nutná jeho kompenzace pomocí paralelního připojení kondenzátorů k asynchronnímu stroji.

#### **2.4.3.2 Synchronní generátor [24]**

Synchronní stroje se zpravidla užívají u vodních elektráren velkých výkonů. Jedná se o generátory trojfázového harmonicky ustáleného napětí. Rotory mají vyniklé póly a jsou pomaluběžné. Frekvence indukovaného napětí ve statorovém trojfázovém vinutí je úměrná počtu pólových dvojic rotoru a jeho otáčkám. Protože síť vyžaduje konstantní frekvenci s minimální odchylkou danou normou, jsou otáčky generátoru udržovány na konstantní hodnotě i při proměnlivém zatížení generátoru. Z toho důvodu je potřeba regulovat otáčky turbíny, která pohání rotor synchronního generátoru. K regulaci indukovaného trojfázového napětí ve vinutí statoru, které se mění dle charakteru a velikosti zátěže, zbývá používat velikost budícího proudu vinutí rotoru. Zdrojem budícího proudu může být libovolný stejnosměrný regulovatelný zdroj. Synchronní generátory dodávají do sítě jalovou složku proudu v závislosti na charakteru zátěže připojené ke svorkám statorového vinutí. Zátěž induktivního charakteru odebírá ze sítě jalový proud, který vzniká při její magnetizaci, a proto je zpět do sítě automaticky dodáván generátorem. Generátor se v takovém případě chová jako kapacita a fázor proudu generovaného ve statorovém vinutí předbíhá fázor indukovaného napětí ve statorovém vinutí při čistě induktivní zátěži o  $90^\circ$ . V takovém případě je fázor indukovaného napětí snížen o úbytek úměrný součinu fázoru statorového proudu a impedance kapacitní zátěže. Tento úbytek indukovaného napětí, které musí být drženo na přibližné konstantní hodnotě dané

normou, je na základě automatické regulace vykompenzován zvýšením budícího proudu vinutí rotoru. Při kapacitní zátěži připojené ke svorkám statorového vinutí synchronního stroje je naopak do sítě dodáván jalový proud v závislosti na velikosti kapacitní zátěže. Generátor se tak vůči síti chová jako indukčnost a generovaný proud ve statorovém vinutí je fázově opožděn za indukovaným napětím o  $90^\circ$  při čistě kapacitní zátěži. V takovém případě je fázor indukovaného napětí ve statorovém vinutí zvýšen o úbytek součinu impedance kapacitní zátěže a fázoru proudu. Zvýšené napětí na svorkách statorového vinutí je sníženo na původní hodnotu požadovanou normou snížením budícího proudu v rotorovém vinutí. Jako kapacitní zátěž se může jevit nezátížené vedení distribuční sítě připojené ke svorkám statorového vinutí synchronního generátoru. Při čistě odporové zátěži by synchronní generátor dodával do sítě čistě činný výkon.

Hlavní výhodou vodních elektráren se synchronním generátorem je regulace napětí, možnost „startu ze tmy“ a schopnost generátoru dodávat či odebírat jalový výkon ze sítě dle charakteru připojené zátěže.

### 3 Legislativa a výroby

Připojení výroben k distribuční síti je spojeno s širokým obsahem vyhlášek a předpisů. Týkají se především cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu pro podporu kombinované výroby elektřiny a tepla, podmínek pro připojení k elektrizační soustavě, měření vyrobené elektřiny, dodržení kvality dodávek elektrické energie a pravidel provozu distribučních soustav.

Energetický zákon **č. 458/2000 Sb.** stanovuje pravidla pro podnikání v oblasti energetiky, tedy v odvětví elektroenergetiky, teplárenství a plynárenství. Dále obsahuje nástroje pro výkon státní správy v energetických oblastech a možnosti vlády vytvářet změny tohoto zákona a od něho se odvíjejících vyhlášek. Dozor a kontrolu nad porušováním tohoto zákona provádí Energetický regulační úřad. Zároveň tento zákon do sebe integruje směrnice Evropské unie týkající se oblasti energetiky. Energetický zákon se v oblasti elektroenergetiky týká účastníků trhu s elektřinou, provozovatelů přenosových, distribučních linek i výrobců a odběratelů elektřiny [26] [27].

Vyhláška č. 51/2006 Sb. novelizovaná vyhláškou **č. 81/2010 Sb.** stanovuje podmínky připojení zdrojů a odběratelů k elektrizační soustavě [28].

Vyhláška č. 540/2005 Sb., v novelizaci vyhláškou **č. 41/2010 Sb.**, určuje kvalitu dodávek elektřiny a penalizace za nedodržení nařízených standardů. Týká se všech subjektů poskytujících služby v elektroenergetice tj. výrobců elektřiny, obchodníků s elektřinou a dodavatelů, správců elektrizační soustavy i velkých odběratelů, kteří by mohli kvalitu dodávek narušit [29].

Vyhláška č. **436/2013 Sb.** určuje regulaci cen v oblasti elektroenergetiky a teplárenství včetně stanovení cen za přenos a distribuci elektřiny, stanovení cen za výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů a za činnosti operátora trhu [30].

Zákon č. **165/2012 Sb.** zahrnuje podporu zdrojů energie. Zásadně se týká kombinovaných výroben elektrické energie a tepla [31].

Pravidla provozu distribučních soustav (**PPDS**) zveřejňují předpisy stanovující požadavky pro připojení uživatelů distribuční soustavy. Vychází z Energetického

zákona a zpracovává navazující vyhlášky, jako je například vyhláška o připojení k elektrizační soustavě, o kvalitě elektřiny a případných služeb v elektroenergetice, vyhláška o předávání údajů pro dispečerské řízení, stavu nouze a havarijního plánu, vyhláška o měření elektřiny a náhradě škody při neoprávněném odběru, či vyhláška tvorby cen za služby v elektroenergetice [31].

## 4 Výrobní a distribuční soustava

### 4.1 Pojmy [32]

$U_n$  je jmenovité napětí sítě.

**Předávací místo** je místo styku mezi distribuční soustavou a zařízením uživatele distribuční soustavy, kde elektřina do distribuční soustavy vstupuje nebo z ní vystupuje.

**Společný napájecí bod** je nejbližší místo veřejné sítě, kam je vyveden výkon vlastního zdroje a kde jsou připojeni odběratelé a ještě mohou být připojeni další odběratelé.

**Výrobní** je elektrárna. Veličiny vztahující se k výrobě mají index „A“.

**Výrobní jednotka (zdroj)** je část elektrárny zahrnující jeden generátor (u fotovoltaik střídač) a zařízení zajišťující jeho provoz. Hranicí výrobní jednotky je místo, kde je spojena s ostatními výrobními jednotkami nebo distribuční sítí. Veličiny související s výrobní jednotkou mají index „E“.

**Vyšší harmonické** jsou sinusové kmity celistvého násobku základního síťového kmitočtu.

**Meziharmonické** jsou sinusové kmity necelistvých násobků základního síťového kmitočtu.

**Flikr** je označení pro kolísání světelného toku svítidel a je postřehnutelný lidským okem. Vyvolávají ho úbytky napětí v oblastech meziharmonického kmitočtu.

### 4.2 Připojení výrobní k síti [32]

Před připojením výrobní elektrické energie k distribuční síti se provádí tzv. studie připojitelnosti. Jedná se o technické vyjádření k připojení výrobní. Porovnávají se napěťové poměry v posuzovaných uzlech sítě, zatížení jednotlivých prvků distribuční soustavy a dodržení limitů zpětných vlivů zanášených do distribuční sítě, popřípadě možné výkonové přetoky do vyšších napěťových hladin a jejich vliv na napěťovou regulaci transformátorů. Studie připojitelnosti v podstatě prověřuje chování elektrárny

v budoucnu připojené do distribuční soustavy za provozních stavů definovaných provozovatelem distribuční sítě.

Podklady pro studii připojitelnosti poskytuje provozovatel distribuční soustavy.

Podklady například obsahují:

- platné požadavky k připojení výrobní na distribuční síť
- zkratový výkon v místě odkud je vliv na síť počítán
- stávající a plánované hodnoty zatížení v soustavě
- parametry transformátorů vvn/vn
- typ a rozměry vedení k místu připojení
- současný a plánovaný stav HDO
- možné provozní stavy sítě
- mapový podklad

Vyhotovení studie připojitelnosti se provádí na základě platné legislativy o provozu distribučních soustav. Je kladen důraz na co nejnižší zpětné ovlivnění distribuční sítě provozem výrobní a efektivní využití jejího pracovního rozsahu. Například stanovení pracovního účinníku výrobní při co nejmenší změně napětí v připojeném místě.

Obecně se vychází z podmínky, že je v předávacím místě distribuční soustavy účinník výrobní roven jedné, pokud provozovatel distribuční sítě nestanoví jinou hodnotu.

Takže by výrobní při tomto účinníku do sítě dodávala jen činný výkon. Ale zároveň je nutné prověřit celý využitelný rozsah jalového výkonu podle provozního PQ diagramu. Výpočty chodu sítě se provádí pro minimální a maximální provozní zatížení.

#### **4.2.1 Spínací zařízení**

Propojení výrobní se sítí provozovatele distribuční soustavy zajišťuje spínací zařízení. To musí být schopné vypínat jak zatížené vedení, tak zkratové proudy. Prokazuje se zkratová odolnost spínacího zařízení na základě nárazového zkratového proudu a zkratového ekvivalentního proudu. Spínací zařízení zajišťuje galvanické oddělení ve všech fázích.

#### **4.2.2 Ochrany**

Zajišťují chránění výroben, osob (např. zkratová ochrana, ochrana proti přetížení, chránění proti nebezpečnému dotyku) a přenosových i distribučních soustav. Ve

vztahu k distribuční síti určuje nastavení ochran provozovatel distribuční soustavy a pro frekvenční ochrany jsou zohledňovány i požadavky provozovatele přenosové soustavy. Napěťové a frekvenční ochrany, reagují na překročení nastavených odchylek napětí a frekvence, kdy následně vybaví dané spínací zařízení. K odpojení od sítě však dochází pouze ve výjimečných případech.

#### **4.2.3 Normální provozní podmínky**

Z hlediska frekvenčního rozsahu jsou elektrárny dle norem schopny trvalého provozu v rozsahu frekvencí 49 – 51 Hz. Dále musí splňovat minimální požadavky na dodávku činného výkonu při podfrekvenci a nadfrekvenci. Například pro frekvenci mezi 47,5 – 48,5 Hz je minimální požadavek na dodávku činného výkonu po dobu 30 minut.

Elektrárna musí obstát výkyvy v síti od  $U_n -15\%$  až  $U_n +10\%$  pro nn hladinu. Pro vn s hladinou 110 kV je rozsah napětí od  $U_n -10\%$  až  $U_n +10\%$ .

#### **4.2.4 Zásady podpory sítě**

Na základě automatického řízení výroby elektrické energie elektrárny je od provozovatele distribuční soustavy kladen požadavek na udržování napětí sítě. Hovoří se o tzv. statické a dynamické podpoře napětí. Dále je zapotřebí, aby výrobní byla schopna automaticky regulovat činný výkon na základě kmitočtu v síti či poměrů v síti a povelů dispečinku provozovatele distribuční soustavy, případně se automaticky odpojit od distribuční soustavy. Dalším požadavkem provozovatele distribuční soustavy na výrobní je možnost řízení jalového výkonu.

##### *Statická podpora napětí*

Statickým podporou napětí výrobní přispívá k udržení smluvně stanovených hodnot napětí v síti při možných pomalých výkyvech napětí sítě.

##### *Dynamická podpora napětí*

Dynamickou podporou napětí se rozumí spoluúčast výrobní na dorovnání poklesů napětí vzniklých v přenosových soustavách tj. v hladinách vvn a zvn. Výrobní v sítích nn, vn a 110 kV proto musí být schopny zůstat připojené i při poruchách způsobujících nežádoucí poklesy napětí. U výroben vn sítě se posuzuje nejmenší sdružené napětí, při kterém zůstanou spolehlivě připojeny. V případě krátkodobých nadpětí zůstávají výrobní jednotky spolehlivě připojeny do 120% dohodnutého napětí po dobu jedné

sekundy a 115% dohodnutého napětí po dobu dvou hodin. Posuzuje se nejvyšší sdružené napětí, kdy výrobní ve vn síti zůstane spolehlivě připojena.

#### 4.2.5 Podmínky pro připojení

K připojení výrobní elektrické energie do sítě provozovatele distribuční soustavy je zapotřebí dodržet stanovené limity a pravidla vycházející z požadavků provozovatele distribuční soustavy.

##### 4.2.5.1 Zvýšení napětí

Provoz připojených výroben elektřiny k síti PDS nesmí v nejhorším možném případě zvýšit napětí o 2 % na hladině vn a 110 kV (ve srovnání s napětím bez jejich připojení). Pro hladinu nn to jsou 3 %.

$$\Delta u_{vn,110\text{ kV}} \leq 2\%$$

$$\Delta u_{nn} \leq 3\%$$

Tuto podmínku lze v případě jednoho přípojného místa pro hladiny vn a nn posoudit pomocí zkratového poměru výkonů

$$k_{k1} = \frac{S_{kv}}{\sum S_{A\text{ max}}}$$

kde  $S_{kv}$  je zkratový výkon v přípojném bodu a  $\sum S_{A\text{ max}}$  je suma maximálních zdánlivých výkonů všech plánovaných výroben.

Podmínka pro zvýšená napětí v případě jednoho předávacího místa v síti pak bude spolehlivě splněna pro hladinu vn a nn při zkratových poměrech

$$k_{k1vn} \geq 50$$

$$k_{k1nn} \geq 33$$

Pro výrobní dodávající do sítě jalový proud, například přebuzené synchronní generátory a pulzní měniče, zároveň platí

V praxi je běžně zadán maximální zdánlivý výkon  $S_{A\text{ max}}$  připojované výrobní elektřiny a je potřeba zjistit zvýšení napětí v připojovaném bodu  $\Delta u_{AV}$

$$\Delta u_{AV} = \frac{S_{A\text{ max}}}{S_{kv}}$$



#### 4.2.5.2 Změny napětí při spínání

Připojování a odpojování jednotlivých zařízení elektrárny nesmí vyvolat nežádoucí zpětné vlivy, které by způsobily v připojovacím místě elektrárny se sítí nejvyšší změnu napětí pro hladinu vn

$$\Delta u_{vn} \leq 2 \%$$

a pro hladinu nn

$$\Delta u_{vn} \leq 3 \%$$

Toto platí pro spínání, které není častější než jednou za 1,5 minuty.

Při nízké četnosti spínání, například jednou denně, může provozovatel distribuční soustavy připustit vyšší změny napětí, pokud to dovolí poměry v síti.

Zároveň při spínání zdrojů nesmí být překročeno jmenovité napětí generátoru o 10 % v předávacím místě hladin nn a vn s ohledem na velikost skutečné hodnoty napětí v tomto místě.

Změnu napětí  $\Delta u_{max}$  při spínání lze odhadnout ze zkratového výkonu ve společném napájecím uzlu  $S_{kv}$ , jmenovitého zdánlivého výkonu výrobní jednotky  $S_{nE}$  a největšího spínacího rázu  $k_{imax}$

$$\Delta u_{vn} = k_{imax} \cdot \frac{S_{nE}}{S_{kv}}$$

$$k_{imax} = \frac{I_a}{I_{nG}}$$

kde  $I_a$  je maximální spínací rázový proud a  $I_{nG}$  je jmenovitý proud generátoru.

Například  $k_{imax} = 8$  je použito, pokud není znám maximální rázový proud spínaného zařízení. Synchronní generátory s jemnou synchronizací a střídače jsou k síti spínány s činitelem zapínacího rázu  $k_{imax} = 1$ .

#### 4.2.5.3 Připojování synchronních generátorů

U připojení synchronního generátoru je nutné nepřesáhnout stanovené napětí frekvenci a fázový rozdíl mezi napětími generátoru a připojovacím místem sítě.

- rozdíl napětí  $\Delta u < \pm 10 \% U_n$
- rozdíl frekvence  $\Delta f < \pm 0,5 \text{ Hz}$
- rozdíl fáze  $< \pm 10^\circ$

V závislosti na poměru impedance sítě k výkonu generátoru můžou být k zabránění nepříznivých zpětných vlivů při spínání stanoveny užší meze.

#### 4.2.5.4 Připojování asynchronních generátorů

Asynchronní generátory rozbíhané motorem jsou připojovány v rozsahu devadesáti pěti až sto pěti procenty synchronních otáček. Takto rozbíhané generátory vlivem svých vnitřních přechodových jevů způsobují krátkodobé poklesy napětí. Takovýto krátkodobý pokles napětí nesmí trvat déle než dvě periody a úbytek napětí nesmí překročit 4 % na hladinách vn a 6 % v sítích nn. Přitom následující periody nesmí překročit 2% úbytek napětí pro sítě vn a 3% úbytek napětí pro sítě nn. V případě, že nejsou uvedeny další kompenzační opatření proudového rázu, je činitel zapínacího rázu  $k_{imax}$  pro takto rozbíhané generátory stanoven

$$k_{imax} = \frac{I_a}{I_{nG}} = 4$$

V případě asynchronních generátorů, které jsou připojovány do ostrovního provozu pod napětím, je nutné dodržet opatření jako pro připojování synchronních generátorů.

#### 4.2.5.5 Připojování výroben se střídači

Střídače jsou spínány pouze, když je jejich střídavá strana bez napětí. V případě elektráren se střídači, schopných ostrovního provozu, které nejsou spínány bez napětí, je nutné dodržet podmínky, jako při spínání synchronních generátorů.

#### 4.2.5.6 Výjimky pro výrobní s obnovitelnými zdroji

Mohou být zproštěny povinnosti poskytnutí primární regulace. Musí dodržovat řídicí a regulační charakteristiky odpovídající současnému stavu techniky.

#### **4.2.6 Zpětné vlivy na napájecí síť**

Zpětné vlivy jsou nepříznivé jevy projevující se v síti provozovatele distribuční soustavy. Vznikají na základě přechodových jevů vznikajících v síti a v zařízeních k ní připojené. Výrobna elektřiny připojovaná k síti provozovatele distribuční soustavy je posuzována na zpětné vlivy a musí vyhovět požadavkům v normách. Kontroluje se změna napětí pro společný napájecí bod, flickr, proudy harmonických a ovlivnění zařízení hromadného dálkového ovládání (HDO).

##### **4.2.6.1 Změny napětí**

Maximální přípustné změny napětí pro společný napájecí bod v síti nn jsou 3 % ze jmenovité hodnoty napětí sítě  $U_n$  a 2 % pro síť 110 kV a vn.

##### **4.2.6.2 Flickr**

Flickr je označení pro subjektivní vjem kolísání světelného toku svítidel. Vzniká vlivem poklesů napětí v meziharmonických frekvencích. Obecně se flickr může projevovat při změnách generování výkonu nebo změnách v odeběrání výkonu. Zkoumá se dlouhodobá míra flickru  $P_{lt}$  v časovém intervalu dlouhém dvě hodiny. Ve společném napájecím bodu je pro jednu výrobní stanovená mez rušení  $P_{lt} \leq 0,46$ . Velikost dlouhodobého rušení flickru  $P_{lt}$  bývá vyhodnocena flickrmetrem. Šíření rušení flickru je přímo úměrné jmenovitému zdánlivému výkonu zařízení, které je vyvolalo a nepřímo úměrné zkratovému výkonu v daném uzlu.

##### **4.2.6.3 Proudů harmonických**

U elektráren jsou hlavními proudovými zdroji vyšších harmonických měniče frekvence a střídače. Výrobci střídačů mají povinnost udávat velikost emitovaných vyšších harmonických, například zprávou o typové zkoušce. Tyto proudy nesmějí přesáhnout nastavené limity provozovatele distribučních soustav.

*Výrobní v síti vn*

V případě, že je v distribuční síti jediné předávací místo, lze výsledný proud vyšších harmonických v předávacím místě  $I_{v\ p\check{r}}$  určit ze vztažného proudu  $i_{v\ p\check{r}}$ , který je udán v tabulce, přenásobeného zkratovým výkonem ve společném napájecím bodě  $S_{kV}$

$$I_{v\ p\check{r}} = i_{v\ p\check{r}} \cdot S_{kV}.$$

Pokud je ve společném napájecím bodě připojeno několik zařízení, je výsledný proud vyšších harmonických z konkrétního zařízení v předávacím místě určen součinem vztažného harmonického proudu z tabulek  $i_{v\ p\check{r}}$ , zkratového výkonu ve společném napájecím bodě  $S_{kV}$  a poměru zdánlivého výkonu konkrétního zařízení  $S_A$  k celkovému zdánlivému výkonu  $S_{AV}$  připojitelnému ve společném napájecím bodě

$$I_{v\ p\check{r}} = i_{v\ p\check{r}} \cdot S_{kV} \cdot \frac{S_A}{S_{AV}}.$$

U zařízení stejného typu je možné výpočet ulehčit dosazením místo zdánlivého výkonu  $S_A$  sumu jmenovitých zdánlivých výkonů výrobních jednotek  $\sum S_{nE}$ . Tak se děje například pro větrné elektrárny. U zařízení z nestejných typů jde pouze o odhad.

Celkové přípustné harmonické proudy vztažené na zkratový výkon v daném uzlu vn hladiny jsou uvedeny v následující tabulce.

Řád harmonické $\mu, \nu$	Přípustný vztažný proud harmonických		
	síť 10 kV	$i_{\mu, \nu \check{r}}$ [A/MVA] síť 22 kV	síť 35 kV
5	0,115	0,058	0,033
7	0,082	0,041	0,023
11	0,052	0,026	0,015
13	0,038	0,019	0,011
17	0,022	0,011	0,006
19	0,016	0,009	0,005
23	0,012	0,006	0,003
25	0,01	0,005	0,003
>25 nebo sudé	0,06/ $\nu$	0,03/ $\nu$	0,017/ $\nu$
$\mu < 40$	0,06/ $\mu$	0,03/ $\mu$	0,017/ $\mu$
$\mu > 40$	0,16/ $\mu$	0,09/ $\mu$	0,046/ $\mu$

Tab. 4.2.6.3 -1 přípustných hodnot vyšších harmonických pro vn hladinu [32]

Celkový úbytek napětí vztažený k jmenovité hladině napětí sítě  $U_n$  vyvolaný proudy vyšších harmonických v jednotlivých vztažných uzlech pro vn hladinu je v jednotkách procent pro jednotlivé harmonické a s jejich narůstajícím řádem klesá tato celková přípustná mez úbytku napětí. Pro každou výrobní nebo odběratele v předávacím místě sítě vn hladiny je stanovena přípustná mez proudů vyšších harmonických vyvolávající úbytek napětí nižší než 0,2%  $U_n$  pro 5. harmonickou a ostatní harmonické 0,1%  $U_n$ .

Celkový harmonický proud od odběratelů a elektrických výroben je určen dle následujících pravidel.

*Pro usměrňovače řízené sítí (6- nebo 12 pulzní)*

Je celkový proud jednotlivých řádů harmonických typických pro usměrňovače (5., 7., 11., 13., atd.) i pro netypické nízké řády ( $v < 7$ ) dán aritmetickým součtem

$$I_v = \sum_{i=1}^n I_{v i}.$$

U vyšších řádů netypických harmonických ( $v > 7$ ) je celkový harmonický proud tohoto řádu roven odmocnině ze sumy kvadrátů proudů tohoto řádu.

$$I_v = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_{v i}^2}$$

*Pulsně modulované střídače*

Pro řád  $\mu$ , který v zásadě není celočíselný, ale některé hodnoty mít celočíselné může, je celkový proud vyšší harmonické daného řádu pro hodnoty  $\mu > 11$  roven odmocnině ze součtu kvadrátů proudů daného řádu produkovaných z jednotlivých zařízení.

$$I_{\mu} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_{\mu i}^2}$$

Pokud se u těchto střídačů vyskytnou netypické harmonické proudy řádu  $\mu < 11$  pak se příspěvky od jednotlivých zařízení sčítají aritmeticky.

$$I_{\mu} = \sum_{i=1}^n I_{\mu i}$$

V síti, kde je více předávacích míst, jsou proudy vyšších harmonických posuzovány v konkrétním předávacím místě s ohledem na ostatní předávací místa. Emitované proudy vyšších harmonických v každém společném napájecím bodu by neměly překročit hodnotu

$$I_{v \text{ p}\check{r}} = i_{v \text{ p}\check{r}} \cdot S_{kV} \cdot \frac{S_{AV}}{S_s}$$

kde  $S_{AV}$  je součet všech napájecích výkonů ve společném napájecím bodě a  $S_s$  je výkon, na který je síť navržena.

V případě, že proudy vyšších harmonických popř. meziharmonických přesahují stanovené limity, je zapotřebí provést podrobnější posouzení. Například pro síť s vyšším podílem kabelových vedení může být impedance sítě v mnoha případech nižší než pro síť venkovních vedení. Takže mohou být přípustné vyšší proudy harmonických. U vyšších harmonických proudů se posuzuje napětí harmonických ve společném napájecím bodě při uvažování skutečné impedance sítě, která je frekvenčně závislá. Pokud uživatel distribuční soustavy produkuje vyšší harmonické nad limitem, je jedním z řešení v omezení proudů vyšších harmonických instalace filtračních jednotek, které tento napěťový úbytek jednotlivých harmonických sníží

na přípustnou mez. Další možností k omezení proudů vyšších harmonických, je připojení výrobní do společného napájecího bodu s vyšším zkratovým výkonem.

#### 4.2.6.4 Zpětné vlivy a HDO

Vysílače pro hromadné dálkové ovládání HDO bývají provozovány u jednotlivých provozovatelů distribučních soustav na konkrétní frekvenci v rozsahu 183,3 Hz až 283,3 Hz. Obvyklá vysílací úroveň signálu HDO je 1,6 % až 2,5 % ze jmenovitého napětí sítě  $U_n$ . Tónová frekvence vysílacího kmitočtu HDO je volena tak, aby nebyla celistvým násobkem vyšší harmonické, která by mohla ovlivňovat napěťovou hladinu vysílacího signálu HDO. Například provozovatel distribuční sítě v Praze užívá frekvenci HDO 216,66 Hz o napěťové úrovni na straně vysílače 6 V a na straně přijímače od 2 do 1,6 V. Vysílač HDO pražského provozovatele je umístěn v blízkosti transformátoru 110/22 kV na straně 110 kV.

Zásadní vliv na útlum signálu HDO můžou mít sací filtry pro kompenzaci vyšších harmonických, které mohou utlumit část signálu HDO, nebo kompenzační kondenzátory s předřadnými tlumivkami pro kompenzaci účinníku. V případě poklesu napěťové úrovně signálu HDO pod stanovenou mez, je nutné zavést protipatření, které poklesu zabrání. Někdy stačí lépe doladit sací filtry, tak aby neobsahovali násobky kmitočtu HDO, případně musí být použity nákladné a technicky velmi propracované hradící členy, které frekvence ovlivňující napěťovou úroveň HDO zatlumí. Hradící členy se řadí do série k případnému zdroji produkující rušivou frekvenci. Útlum HDO způsobují mimo jiné i točivé stroje, jako jsou generátory a motory.

Maximální přípustný pokles napětí HDO, který výrobní elektřiny může způsobit, je 5 % a to za podmínky, že nedojde k poklesu napětí HDO pod minimální úroveň. Minimální napěťová úroveň HDO pro frekvenční rozsah 183 – 283,3 Hz je pro: nn hladinu 150%  $U_f$ , vn hladinu 190%  $U_f$ , 110 kV 200%  $U_f$ , kde  $U_f$  je náběhové napětí přijímače, které obvykle bývá v rozmezí 0,8 – 0,9 %  $U_n$ .

Před uvedením výrobní do provozu se zkoumá její vliv na signál HDO. Dochází k posouzení zatížení vysílače HDO, které pro VN hladinu nesmí překročit 2 A a pro hladinu 110 kV nesmí překročit 5 A. Dále je posuzován vliv vyšších harmonických, případně sacích filtrů pro vyšší harmonické na HDO. Obecně pro frekvence blízké vysílací frekvenci HDO nesmí velikost rušivého napětí překročit 0,1 %  $U_n$  a pro

napětí, která jsou 100 Hz nad případně pod vysílacím kmitočtem HDO, nesmí velikost rušivého napětí překročit  $0,3 \% U_n$ .

#### 4.2.7 Připojení výrobní z nadzemního vedení VN přípojkou výrobce

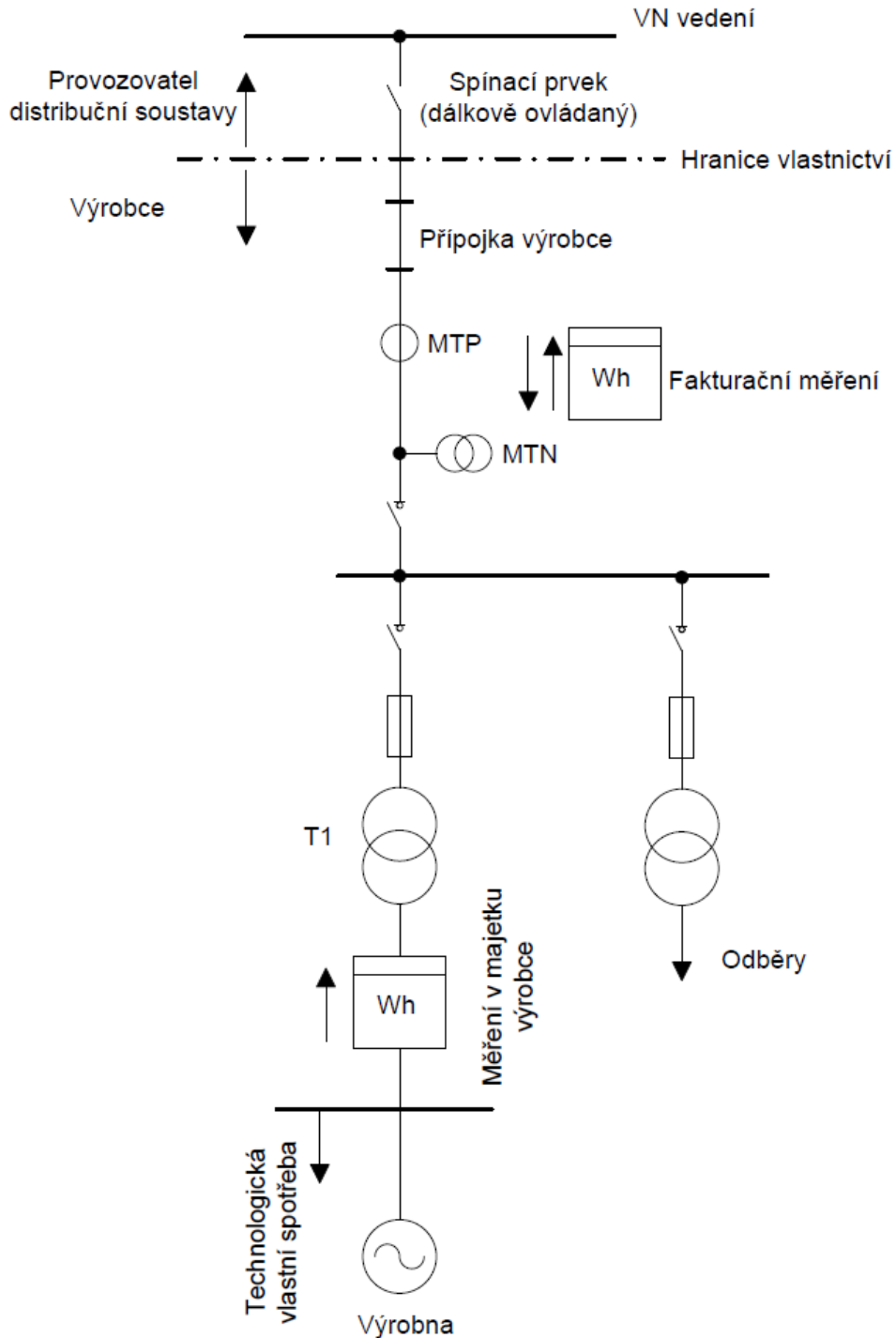


Schéma 4.2.7 -1 Připojení plánovaného generátoru k síti [32]

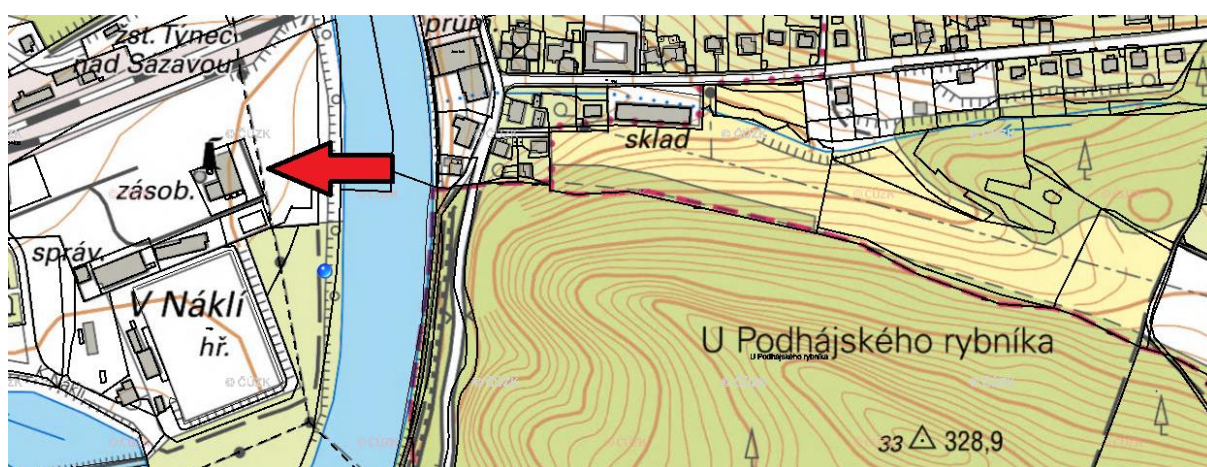


## 5 Ověření vlivu teplárny na distribuční soustavu

Tato kapitola přináší posouzení připojitelnosti synchronního generátoru teplárny Týnec na distribuční síť provozovatele.

### 5.1 Lokalizace teplárny

Teplárna s plánovaným generátorem k připojení do distribuční sítě 22 kV se nachází v katastrálním území obce Týnec nad Sázavou v těsné blízkosti vn vedení, což je velice výhodné z hlediska přípojky.



Obr. 5.1 -1 Lokalizace teplárny s připojovaným generátorem [33]

### 5.2 Technická data plánovaného generátoru

Do distribuční přenosové soustavy je plánováno připojení synchronního generátoru o jmenovitém činném výkonu 4,5 MW. Generátor bude připojen na napětovou hladinu 22 kV přes transformátor T1 pomocí nadzemního vedení, viz schéma 4.2.7-1. Další parametry o typu generátoru přinese následující tabulka.

Generátor	Synchronní, čtyřpólový, hladký rotor
Jmenovité otáčky pro 50 Hz	1500 ot/min
Jmenovité napětí	10,5 kV
Meze účinníku pro vn	$\pm 0,95$ až 1
Jmenovitý činný výkon	4,5 MW
Rázová reaktance	14%
Chlazení	IC616
Krytí	IP 54

*Tab. 5.2 -1: parametry generátoru [34] [16]*

### **Blokový transformátor T1**

Blokový transformátor převádí výkon z napěťové hladiny generátoru 10,5 kV na napěťovou hladinu distribuční soustavy 22 kV. Napětí nakrátko odpovídá 12 % a ztráty nakrátko 50 kW. Na nižší napěťové hladině je vinutí spojeno do trojúhelníka, na vyšší do hvězdy bez uzemněného bodu. Jmenovitý výkon transformátoru je 6,3 MVA [34] [16].

**Schéma přípojky generátoru k síti** je obdobné *schématu 4.2.7 -1* z kapitoly *4.2.7 Připojení výroby z nadzemního vedení VN přípojkou výrobce*.

## 5.3 Zkoumaný úsek sítě

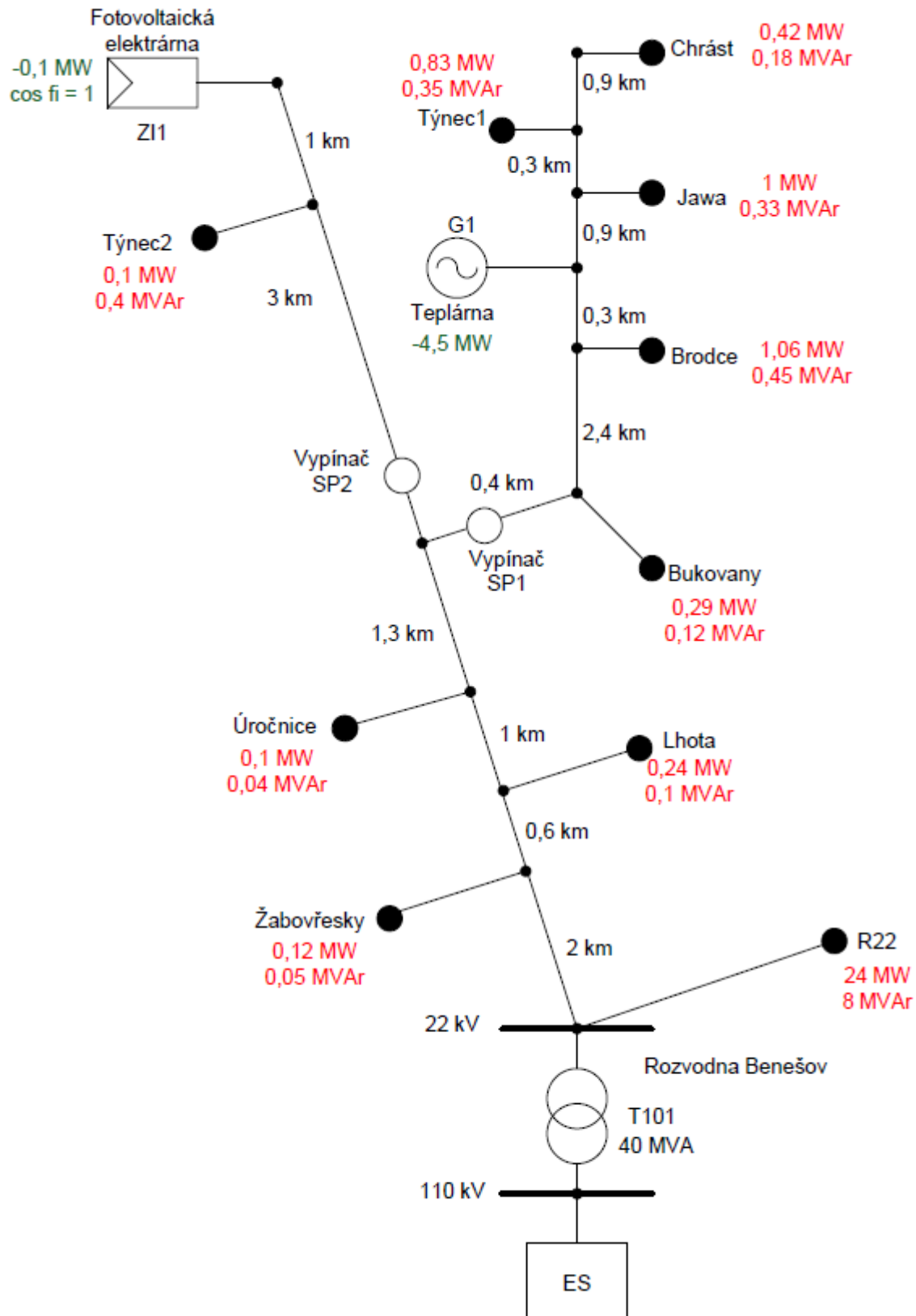
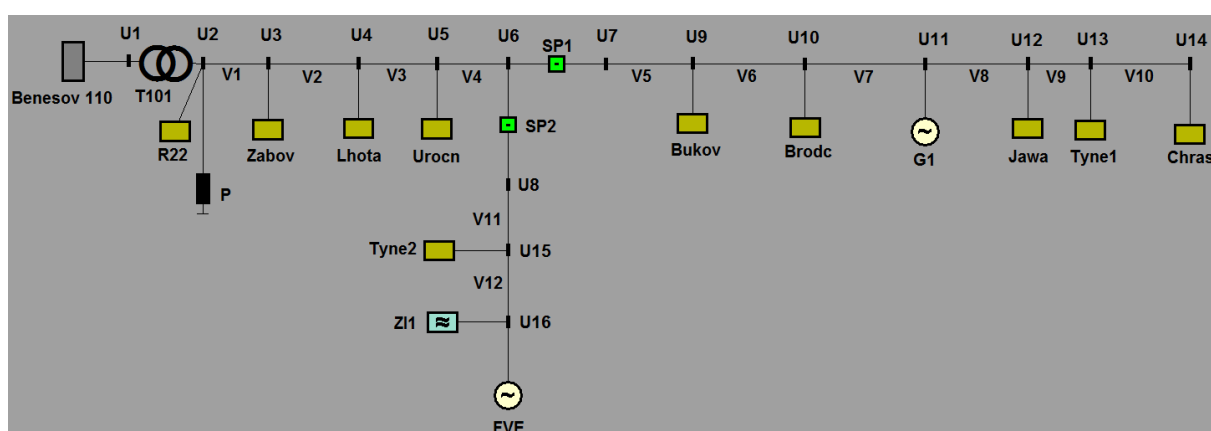


Schéma 5.3 -1 Posuzovaná topologie sítě

Jak je vidět ze zadané topologie sítě, společný napájecí bod je u rozvodny Benešov na napěťové straně transformátoru 22 kV. Ze společného napájecího bodu vychází paprsek nejen modelované části sítě, ale i paprsky ostatních sítí, které jsou v modelu zohledněny zátěží R22. Modelovaná část vedení se větví do dvou úseků. V jednom úseku se nachází plánovaný synchronní generátor teplárny, v druhém úseku je fotovoltaická elektrárna. Větve jsou chráněny před zkraty a nadproudy vypínači SP1 a SP2. Vliv těchto výroben na síť je modelován v programu E-Vlivy. Protože však program E-Vlivy povoluje maximálně pět znaků na jméno prvku, jsou delší názvy jednotlivých odběrů účelově zkráceny.



*Schéma: 5.3 -2 posuzovaná topologie sítě v programu E-Vlivy [34]*

T101 je transformátor rozvodny Benešov. Převádí napěťovou hladinu 110 kV na 22 kV. Primární vinutí strany 110 kV je spojeno do hvězdy s uzemněným středem, sekundární do hvězdy uzemněné přes tlumivku P, která kompenzuje poruchové proudy zemního spojení. Na výpočet ustáleného chodu sítě, však nemá tlumivka vliv. Jednotlivé úseky vedení obsahují znak V. Uzly kam je připojena zátěž nebo výrobná nesou znak U, vypínače jsou značeny jako SP, plánovaný generátor G1, zdroj vyšších harmonických ZI1 a fotovoltaika FVE [34].

### 5.3.1 Parametry napájecího bodu

Napájecí bod přivádí do distribuční soustavy výkon potřebný k pokrytí spotřeby a ztrát v síti. Výkon z napájecího bodu vyšší napěťové hladiny do nižší převádí transformovna umístěná v rozvodně, v tomto případě rozvodně Benešov. K řešení ustáleného chodu sítě potřebujeme znát následující parametry napájecího bodu.

Napájecí bod	$U_n$ (kV)	$U_{\text{prov}}$ (kV)	$I_{\text{zkr}}$ (kA)	$S_{\text{zkr}}$ (MVA)
Benešov 110	110	110	12	2 286

Tab. 5.3.1-1 Parametry napájecího uzlu Benešov [34]

$U_n$  (kV) jmenovitá napěťová hladina sítě

$U_{\text{prov}}$  (kV) provozní napětí

$I_{\text{zkr}}$  (kA) zkratový proud

$S_{\text{zkr}}$  (MVA) zkratový výkon

Transformátor T101 v rozvodně Benešov má vinutí na napěťové straně 110 kV spojeno do hvězdy s uzemněným středem. Vinutí na straně 22 kV je také spojeno do hvězdy, s uzemněným středem přes tlumivku, takže v řešení ustáleného stavu sítě se jeví jako hvězda s neuzemněným středem. Parametry transformátoru T101 potřebné k řešení výkonových toků a dalších ustálených jevů v síti přináší následující tabulka.

T101	$U_{n1}$ (kV)	$U_{n2}$ (kV)	$S_t$ (MVA)	$P_k$ (kW)	$u_k$ (%)
	110	23	40	170	11,5
	$I_{n1}$ (A)	$I_{n2}$ (A)	$i_0$ (%)	$P_0$ (kW)	-
	210	1004	0,25	29,3	-

Tab. 5.3.1-2 Parametry transformátoru T101 rozvodny Benešov [34]

$U_{n1}$  (kV) jmenovité napětí primárního vinutí

$U_{n2}$  (kV) jmenovité napětí sekundárního vinutí

$S_t$  (MVA) jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru

$P_k$ (kW)	ztráty nakrátko
$u_k$ (%)	poměrné napětí nakrátko
$I_{n1}$	jmenovitý proud primárního vinutí
$I_{n2}$	jmenovitý proud sekundárního
$i_0$ (%)	vztažný proud transformátoru v chodu naprázdno
$P_0$ (kW)	ztráty transformátoru v chodu naprázdno

Tlumivka P	$U_n$ (kV)	$Q_n$ (MVar)	$I_n$ (A)	$X_0/X_1$	$R_0/R_1$	R/X
	23	2,4	60	1	1	0,01

Tab. 5.3.1-3 Parametry zemnicí tlumivky [34]

Tlumivka kompenzuje poruchové proudy zemních spojení. Ve výpočtu ustáleného chodu sítě se neuplatňuje a je zde uváděna pouze pro úplnost.

$U_n$ (kV)	jmenovité napětí tlumivky
$Q_n$ (MVar)	kompenzační výkon tlumivky
$I_n$ (A)	jmenovitý kompenzační proud tlumivky
$X_0/X_1$ (-)	podíl reaktancí sousledné a netočivé složky
$R_0/R_1$ (-)	podíl odporů sousledné a netočivé složky
R/X (-)	podíl odporu a reaktance vinutí tlumivky

Jmenovitý kompenzační proud  $I_n$  je odhadnut při uvažování 1 A/km kapacitního proudu při odhadnuté délce 60 km vedení všech větví připojených do společného napájecího bodu.

### 5.3.2 Parametry vedení

Typem použitého venkovního vedení je lano AlFe6 s parametry viz *Tab. 5.3.2-1*

Typ	R/km ( $\Omega$ /km)	X/km ( $\Omega$ /km)	B/km ( $\mu$ S/km)	Imax (A)
110/22AlFe6	0,259	0,368	1,46	318

*Tab. 5.3.2-1 Parametry lana [34]*

Imax (A)      maximální dovolený provozní proud lana

Délky vedení jednotlivých úseků vedení jsou vyznačeny jak ve *schématu 5.3-1* tak v následující tabulce *Tab. 5.3.2-2*.

Úsek vedení	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12
délka (km)	2	0,6	1	1,3	0,4	2,4	0,3	0,9	0,3	0,9	3	1

*Tab. 5.3.2-2 vzdálenosti vedení [34]*

### 5.3.3 Parametry odběrů

Jak lze pozorovat ze schématu sítě modelované oblasti (*schéma 5.3-1*), odběratelé elektrické energie jsou připojeni na hladinu 22 kV. Tvoří je obce a drobné průmyslové podniky, takže se v modelu neuvažuje, že by zanášeli do sítě zpětné vlivy jako je flickr nebo vyšší harmonické. Zátěže jsou provozovány při induktivním účinníku 0,95 bez kompenzace jalového výkonu. Zátěž R22 respektuje ostatní sítě připojené do společného napájecího bodu na napěťové hladině 22 kV transformátoru T110 rozvodny Benešov. Hodnoty jednotlivých odběrů jsou vyznačeny jak ve schématu modelované oblasti (*schéma 5.3-1*), tak vypsány v následující tabulce (*Tab. 5.3.3-1*).

Odběratel	P (MW)	Q (MVA <sub>r</sub> )
R22	24	8
Žabovřesky	0,12	0,05
Lhota	0,24	0,1
Úročnice	0,1	0,04
Bukovany	0,29	0,12
Brodce	1,06	0,45
Jawa	0,1	0,033
Týnec1	0,83	0,35
Chrást	0,42	0,18
Týnec2	0,1	0,4

Tab. 5.3.3-1 Odběratelé [34]

#### 5.3.4 Parametry výroben v distribuční síti

V posuzované síti se nachází dvě výrobní dodávající výkon do distribuční sítě, fotovoltaická elektrárna ZI1 a plánovaný synchronní generátor teplárny G1.

**Fotovoltaická elektrárna** má instalovaný výkon 100 kWp a při simulaci stavu sítě je považována za proudový zdroj dodávající do sítě jmenovitý proud  $I_n = 2,62$  A. Vlivem šesti pulzního měniče jsou do sítě produkovány vyšší harmonické, jejichž hodnoty nesmí překročit stanovené limity. Pro pátou harmonickou to jsou 0,2 % ze jmenovitého napětí v předávacím místě sítě hladiny vn a pro ostatní harmonické 0,1 %.

Maximální limity vybraných harmonických proudů, které dle normy garantuje výrobce šesti pulzních měničů, ukazuje následující tabulka.

Řád harmonické	$I_n$ (%)
5	20
7	14,29
11	9,09
13	7,69

Tab. 5.3.4-1 limity pro vybrané harmonické u šesti pulzního měniče [34]

$I_n$  (%) velikost harmonického proudu, dodává-li měnič do sítě jmenovitý proud



Parametry **synchronního generátoru** jsou blíže popsány v kapitole 5.2, nicméně v simulačním programu E-Vlivy je nutné pro výpočet ustáleného chodu sítě zadat následující parametry generátoru.

Generátor G1	P (MW)	cos $\phi_i$	$x_d''$ (%)	U (kV)
	4,5	$\pm 0,95$ až 1	14+12=26	22

Tab. 5.3.4-2 Parametry synchronního generátoru v programu E-Vlivy

P (MW) provozní činný výkon generátoru

cos  $\phi_i$  provozní účinník generátoru na hladině vn

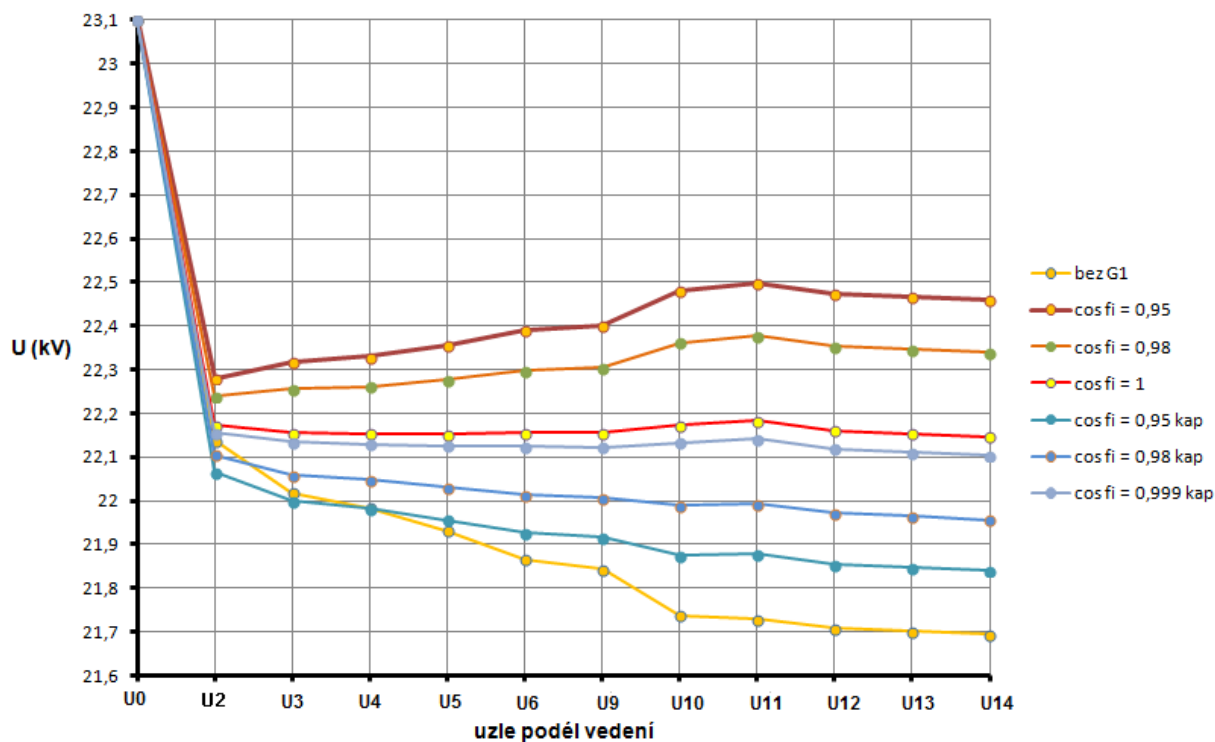
$x_d''$  (%) výsledná rázová reaktance blokového transformátoru a generátoru G1

U (kV) napěťová hladina, kam je generátor G1 přes blokový transformátor T1 připojen

#### 5.4 Modelace ustáleného chodu sítě

Jak již bylo zmíněno výše v kapitole 5.3, výpočet ustáleného chodu sítě s ohledem na zpětné vlivy je proveden v programu E-Vlivy. Stav sítě je řešen na základě metody uzlových napětí, konkrétně Gauss – Seidel interakční metody, kdy ze vstupních dat pro jednotlivé uzly jsou, na základě řešení vzniklých lineárních diferenciálních rovnic, určeny hledané výsledky s požadovanou přesností. Výpočetní metoda použitá v programu E-Vlivy je v souladu s platnými normami. Výsledky simulace ustáleného chodu sítě přinesou následující kapitoly.

### 5.4.1 Napěťový profil podél vedení, ztráty



Graf 5.4.1-1 Napěťový profil podél vedení [34]

V bodě U0 je vyznačeno napětí napájecího transformátoru T101 na napěťové straně 22 kV, které je udržováno regulací na hodnotě 23,1 kV.

Z napěťového profilu podél vedení je patrná velikost napětí v konkrétních uzlech sítě pro dané provozní stavy plánovaného generátoru teplárny G1. Jak je vidět pro síť bez připojeného generátoru G1, je pokles napětí ve sledovaných uzlech soustavy nejvýraznější a úměrný velikosti a typu charakteru připojené zátěže a vzdálenosti od společného napájecího bodu. S připojeným synchronním generátorem G1 k předávacímu místu soustavy v uzlu U11 v závislosti na účinníku a velikosti výkonu generátoru je napětí v jednotlivých uzlech sítě vyšší než bez připojení generátoru. Jestliže má generátor kapacitní účinník, je zvýšení napětí v daném uzlu menší než při té samé hodnotě účinníku induktivního charakteru. V uzlu U11, kde je synchronní generátor G1 provozován, a k uzlu U11 přilehlých uzlech, kde není tak výrazný odběr jako v uzlech přilehlých ke společnému napájecímu bodu U2, dokonce přesáhla napěťová hladina při induktivním účinníku generátoru 0,98 a 0,95 vyšší hodnotu než

ve společném napájecím bodě U2 rozvodny Benešov. Avšak z hlediska rozdílů napětí před připojením a po připojení v předávacím místě synchronního generátoru G1 v uzlu U11 nesmí být rozdíl vyšší než 2 %. Bohužel, jak bude patrné z následujících výsledných tabulek uvedených v dalších kapitolách nebo při přepočtu hodnot z grafu v uzlu U11, je překročen 2% limit úbytku napětí před připojením a po připojení generátoru k síti při provozování generátoru s účínkem rovno jedné a tím pádem i účínkem induktivního charakteru. To značně omezuje provozní režim generátoru, kdy podle těchto výsledů simulace může být za normálního chodu provozován pouze s kapacitní hodnotou účínku od 0,95 do 0,99. V obecném případě z hlediska PQ diagramu synchronního stroje je navíc dodávaný činný výkon do sítě a odebíraný jalový výkon ze sítě při kapacitním účínku 0,95 až 0,99 omezen oteplením čel od proudů statorového vinutí v porovnání se stejným účínkem induktivního charakteru, kdy je elektrický výkon dodávaný do sítě omezen pouze výkonem hnacího stroje pohánějící rotor generátoru při uvažování povoleného provozního účínku  $\pm 0,95$  až 1.

#### Ztráty v síti a provoz generátoru

Generátor G1	S (MVar)	0	4,953	4,75	4,575	4,562	4,589	4,684
	P (MW)	0	-4,705	-4,655	-4,575	-4,558	-4,497	-4,45
	Q (MVar)	0	-1,546	-0,945	0	0,204	0,913	1,462
	Účíník	-	0,95	0,98	1	-0,999	-0,98	-0,95
Celkové ztráty v síti	dP (MW)	0,157	0,11	0,111	0,118	0,12	0,131	0,144

Tab. 5.4.1 -1 Výkony synchronního generátoru G1 a celkové ztráty v síti v závislosti na provozním účínku stroje G1 [34]

Z tabulky 5.4.1 -1 je také patrná dodávka činného a jalového výkonu do sítě generátorem G1 v závislosti na účínku stroje.

Podle zpracovaných výsledků je z hlediska celkových ztrát velice výhodné provozovat synchronní generátor s induktivním účínkem, protože oproti kapacitnímu jsou v distribuční soustavě zaznamenány nižší ztráty.

Bez připojení generátoru G1 jsou celkové ztráty v síti logicky nejvyšší. Neboť výkon, který nedodá generátor G1, musí dodat napájecí soustava z hladiny 110 kV přes transformátor T101 a vedení až k místu jeho spotřeby. Výsledky tak potvrzují pravidlo, kdy s instalací zdrojů výkonu v blízkosti odběratele vyrobeného výkonu,

klesají celkové ztráty v síti. Transformátor T101 má cca devětkrát vyšší výkon než generátor G1. Přenos výkonu z napěťové hladiny 110 kV na hladinu 22 kV až ke konečnému spotřebiteli je tak doprovázen značnými ztrátami v transformátoru a vedení. Čím vyšší výkon transformátor rozvodny Benešov převádí, tím vyšší jsou logicky i ztráty při transformaci. Řešení výkonových toků v simulačním programu E-Vlivy ukázalo, že ztráty transformátoru T101 mají ve sledovaném úseku sítě nejvyšší podíl na celkových ztrátách a klesají úměrně s vyrobeným výkonem z lokálních zdrojů, který je spotřebován přílehlými odběrateli.

#### 5.4.2 Vyšší harmonické v síti

Zdrojem vyšších harmonických v modelu sítě je střídač fotovoltaické elektrárny v předávacím místě v uzlu U16. Synchronní generátor je připojený k síti bez měniče, a tak u něho není předpoklad dodávky vyšších harmonických do sítě. Fotovoltaická elektrárna je proto považována za jediný zdroj vyšších harmonických v modelované síti.

Řád	#5	#7	#11	#13	#17
Uzel	u (%)	u (%)	u (%)	u (%)	u (%)
U1	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003
U2	0,025	0,023	0,020	0,018	0,016
U3	0,037	0,035	0,030	0,028	0,025
U4	0,040	0,038	0,034	0,032	0,028
U5	0,046	0,044	0,039	0,037	0,034
U6	0,054	0,052	0,047	0,045	0,041
U7	0,054	0,052	0,047	0,045	0,041
U8	0,054	0,052	0,047	0,045	0,041
U9	0,054	0,051	0,046	0,044	0,041
U10	0,050	0,048	0,043	0,041	0,038
U11	0,050	0,048	0,043	0,041	0,038
U12	0,050	0,048	0,043	0,041	0,038
U13	0,050	0,048	0,043	0,041	0,037
U14	0,050	0,048	0,043	0,041	0,037
U15	0,077	0,074	0,069	0,066	0,062
U16	0,085	0,082	0,076	0,074	0,070

Tab. 5.4.2-1 Vyšší harmonické v síti s generátorem G1 [34]

u (%)            procentní úbytek napětí stanovený ke jmenovitému napětí sítě

Z tabulky úbytků napětí vyšších harmonických v jednotlivých uzlech sítě na hladině 22 kV lze vyzorovat, že je úbytek harmonických napětí nejnižší pro společný

napájecí bod v uzlu U2 (pokud vynecháme uzel U1 hladiny 110 kV), kde je současně nejvyšší zkratový výkon, a dále postupně stoupá s klesajícím zkratovým výkonem v jednotlivých uzlech soustavy až ke zdroji vyšších harmonických, fotovoltaické elektrárně. S klesajícím zkratovým výkonem totiž roste admitance, která část harmonického proudu v daném uzlu s připojenou zátěží uzavírá přes zem a nepouští dál do sítě. Z uvedených výsledků z výpočtu vyšších harmonických v programu E-Vlivy je také patrný všeobecný fakt, že se vzrůstajícím řádem vyšších harmonických obsažených v síti klesá proud harmonické a tím i úbytek napětí vyvolaný daným řádem harmonické. Fotovoltaická elektrárna nepřekračuje ani v jednom řádu vyšší harmonické stanovený limit úbytku napětí 0,2 % a 0,1 % ze jmenovitého napětí sítě 22 kV v předávacím místě sítě, uzlu U16. Měnič fotovoltaické elektrárny zanáší do sítě i vyšší řády harmonických než jsou uvedeny v tabulce *Tab. 5.4.2-1*, ale pro vysoký objem dat je zde neuvádím. Je však ověřené, že nepřesáhly stanovený limit procentuálního úbytku napětí.

	U (V)	Úhel (°)	u (%)	Ih (A)	Úhel (°)	ih (%)
<b>U1</b>	5,291	62,538	0,005	---	---	---
<b>U2</b>	6,548	61,758	0,030	0,188	1,011	0,028
<b>U3</b>	9,712	66,583	0,044	0,001	1,079	0,041
<b>U4</b>	10,670	67,484	0,048	0,003	1,095	0,045
<b>U5</b>	12,273	68,718	0,056	0,001	1,120	0,052
<b>U6</b>	14,365	69,934	0,065	---	---	---
<b>U7</b>	14,365	69,934	0,065	---	---	---
<b>U8</b>	14,365	69,934	0,065	---	---	---
<b>U9</b>	14,351	69,704	0,065	0,005	1,134	0,060
<b>U10</b>	14,277	68,468	0,065	0,018	1,110	0,060
<b>U11</b>	14,272	68,382	0,065	---	---	---
<b>U12</b>	14,257	68,121	0,065	0,002	1,123	0,062
<b>U13</b>	14,253	68,040	0,065	0,014	1,103	0,060
<b>U14</b>	14,248	67,959	0,065	0,007	1,101	0,060
<b>U15</b>	19,333	72,995	0,088	0,002	1,194	0,082
<b>U16</b>	20,999	73,712	0,095	---	---	---

*Tab. 5.4.2. -2 Harmonická analýza páté harmonické bez připojeného generátoru [34]*

U (V)	úbytek napětí vyšší harmonické v daném uzlu hladiny 22 kV
u (%)	úbytek napětí vyšší harmonické v procentní hodnotě vztažený ke jmenovitému napětí sítě
$I_h$ (A)	proud vyšší harmonické uzavírající se přes zařízení v daném uzlu
$i_h$ (%)	proud vyšší harmonické vyjádřené v procentech, vztažené k základní harmonické proudu generované měničem fotovoltaiky v uzlu U16

V porovnání úbytku napětí u (%) páté harmonické z tabulky *Tab. 5.4.2. -2* před připojením generátoru G1 a tabulky *Tab. 5.4.2. -1* po připojení generátoru G1 je patrné, že Generátor G1 částečně saje pátou harmonickou, která je v blízkosti rozsahu vysílacího kmitočtu HDO. Takže po připojení generátoru G1 k síti hrozí riziko útlumu napěťové úrovně HDO.

#### **5.4.3 Vliv generátoru na útlum signálu HDO**

Z níže uvedené tabulky je patrné, že plánovaný generátor G1 způsobuje výrazný pokles útlumu signálu HDO. Podle těchto výsledků je před generátor nutné připojit hradící člen, který bude při frekvenci HDO a blízké frekvenci HDO vykazovat vysokou impedanci, která přestane sít signál HDO. Podle pravidel provozovatele distribuční soustavy je v předávacím místě povolen maximálně 5% útlum vysílací úrovně HDO. Zde je podle výpočtu v předávacím místě v uzlu U11 útlum přes 22 %. Také je možné vybudovat v blízkosti generátoru podpůrné vysílače HDO. Bohužel obě varianty jak vysílač, tak hradící jsou značně časově i finančně nákladné a technologicky složité řešení.

Uzel	dU (%)
U1	0
U2	6,35
U3	10,288
U4	11,484
U5	13,49
U6	16,123
U7	16,123
U8	16,123
U9	16,938
U10	21,87
U11	22,491
U12	22,491
U13	22,491
U14	22,491
U15	16,123
U16	16,123

Tab. 5.4.3 -1 Útlum signálu HDO generátorem G1 při frekvenci 216,66 Hz [34]

dU (%)      úbytek napětí, o který je snížena napěťová úroveň signálu HDO

Z tabulky útlumu vysílacího signálu HDO (Tab. 5.4.3-1) lze pozorovat, jak se zvyšujícím se zkratovým výkonem směrem ke společnému napájecímu uzlu U2 klesá nepříznivý útlum signálu HDO.

#### **5.4.4 Kolísání napětí v síti, flickr**

V modelovaném úseku sítě se nenachází žádné možné zdroje flickru a také v každém uzlu U1 až U16 byla vypočtena nulová hodnota flickru.

#### **5.4.5 Vliv generátoru na napětí v připojovacím bodu**

Plánovaný generátor G1 má být připojen do uzlu U11. Podle Pravidel provozování distribučních soustav, přílohy 4, nesmí být rozdíl úbytků napětí před připojením uživatele k uzlu distribuční sítě vn hladiny větší než 2 %. Podle výpočtů v programu E-Vlivy je možné provozovat synchronní generátor G1 pouze s účinnkem od -0,95 do -0,999, kdy rozdíl napětí před připojením a po připojení generátoru k síti nepřesáhne 2 %. Při provozu generátoru s účinnkem od 1 do 0,95 induktivního charakteru jsou porušována pravidla provozovatele distribučních soustav.

Účinník	Uzel	dU před (%)	dU po (%)	rozdíl
-0,95	U11	1,237	0,555	0,683
-0,98	U11	1,237	0,028	1,21
-0,999	U11	1,237	-0,697	1,934
1	U11	1,237	-0,891	2,128
0,98	U11	1,237	-1,763	3
0,95	U11	1,237	-2,293	3,53

Tab. 5.4.5 -1 Posouzení provozu G1 z hlediska změny napětí [34]

dU před (%)            procentní rozdíl napětí v daném uzlu od jmenovitého napětí distribuční soustavy (tj. 22 kV) před připojením uživatele k síti

dU po (%)             procentní rozdíl napětí v daném uzlu od jmenovitého napětí sítě po připojení uživatele distribuční sítě



## 6 Vyhodnocení výsledků pro konkrétní situaci v síti

Podle zpracovaných výsledků o posouzení zpětných vlivů synchronního generátoru na distribuční síť jsou patrné následující závěry.

Generátor je možné trvale provozovat s kapacitním účínkem od hodnoty 0,95 do 0,999. S účínkem rovno jedné nebo induktivním účínkem je překročen limit rozdílu napětí před připojením a po připojení uživatele k danému uzlu v distribuční síti. Takže trvalý provoz generátoru pod tímto účínkem by znamenal porušení Pravidel provozování distribučních soustav.

Z hlediska flikru není simulován v modelu sítě žádný zdroj tohoto rušivého vlivu a ani plánovaný synchronní generátor teplárny jím není. Synchronní generátor je připojen k síti bez střídače přes blokový transformátor, a proto by měl být zdrojem pouze základní harmonické, nikoli vyšších harmonických. Tato úvaha byla simulací potvrzena. Plánovaný synchronní generátor neemituje do sítě vyšší harmonické. Uvažovaným zdrojem vyšších harmonických v síti je fotovoltaická elektrárna se šesti pulzním měničem. Ta emituje do sítě liché násobky základní harmonické, ale limity dané normou nejsou překročeny. Při ověřování vlivu generátoru na útlum signálu HDO bylo zjištěno, že je vyšší než povoluje norma. Generátor připojený k síti vyvolává výrazný pokles úrovně signálu HDO a to až o více jak 22 % oproti stavu bez připojení generátoru. Maximální povolený útlum signálu HDO po připojení uživatele do vybraného uzlu distribuční soustavy je 5 % za předpokladu, že vlivem tohoto útlumu neklesne velikost signálu HDO pod minimální mez danou normou. Při tak vysokém útlumu signálu HDO je provoz výroby nepřijatelný je nutné nainstalovat mezi generátor a připojovací uzel sítě hradící člen, který omezí rušení signálu HDO na přijatelnou mez.

Provoz připojeného generátoru je příznivý z hlediska celkových ztrát v síti. Ze simulace ustáleného chodu sítě to jasně vyplývá. Potvrzuje se tak i obecný jev, kdy s instalací zdrojů v blízkosti připojení spotřebitele elektrické energie, klesají přenosové ztráty v síti.

## Závěr a shrnutí diplomové práce

Diplomová práce byla zpracována na základě pokynů ze zadání.

Úvodní kapitoly popisují základní princip funkce vybraných typů výroben elektrické energie z obnovitelných zdrojů a jejich současný význam a vliv na evropskou elektrizační soustavu, včetně iniciativy Evropské unie snížit emise oxidu uhličitého o 20 % a dosáhnout 20% finančních úspor zvýšením celkového podílu vyrobené elektrické energie z obnovitelných zdrojů na minimálních 20 % do roku 2020 a do roku 2030 minimálních 27 %. V práci jsou uvedeny základní legislativní dokumenty týkající se připojení výroben elektrické energie k elektrizační síti, včetně zpracování Pravidel provozování distribučních soustav, přílohy 4. Závěrečná část práce zpracovává a vyhodnocuje výsledky modelace ustáleného chodu sítě před a po připojení plánovaného synchronního generátoru teplárny. Připojitelnost a provozní stavy generátoru byly posuzovány podle legislativní části týkající se zpětných vlivů v síti. Konkrétní závěry o posouzení připojitelnosti generátoru teplárny jsou na předchozí stránce v kapitole 6.

## Seznam literatury

- [1] Mastný, P., Drápela, J., Mišák, S., Macháček, J., Ptáček, M., Radil, L., Bartošík, T., Pavelka, T., Obnovitelné zdroje elektrické energie, České vysoké učení technické v Praze, 2011. 256s. ISBN 978-80-01-04937-2
- [2] Toman, P., Drápela, J., Mišák, S., Orságová, J., Paar, M., Topolánek, D., a kol., Provoz distribučních soustav, České vysoké učení technické v Praze, 2011. 264s. ISBN 978-80-01-04935-8
- [3] Média FAQ. ČEPS, a.s. [online]. © ČEPS, a.s., 2015 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z <http://www.ceps.cz/CZE/Media/Stranky/FAQ.aspx>
- [4] Větrné elektrárny v Evropě. Česká společnost pro větrnou energii [online]. © 2013 Česká společnost pro větrnou energii [cit. 2015-03-01]. Dostupné z <http://www.csve.cz/clanky/vte-v-evrope/282>
- [5] SOLÁRNÍ PROJEKT DESERTEC KONČÍ. Zprávy E15.cz [online]. Copyright 2015 Mladá fronta a. s. [cit. 2015-03-01]. Dostupné z <http://zpravy.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/solarni-projekt-desertec-konci-opustila-jej-vetsina-clenu-1128170>
- [6] Tisková zpráva. Evropský parlament [online]. Poslední aktualizace: 23. ledna 2008 [cit. 2015-03-01]. Dostupné z <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+IM-PRESS+20080122IPR19355+0+DOC+XML+V0//CS>
- [7] Koncentrátorové solární elektrárny. Ekoblog.cz [online]. © Copyright ekoblog.cz 2007 – 20014. ISSN 1803-6252. Zodpovědný editor Jan Horčík [cit. 2015-03-04]. Dostupné z <http://www.ekoblog.cz/?q=node/182>
- [8] Ekonomika. iDNES.cz [online]. © Copyright 1999–2015 MAFRA, a. s. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z [http://ekonomika.idnes.cz/cez-tendr-temelin-dostavba-paces-dok/ekonomika.aspx?c=A140608\\_140703\\_ekonomika\\_aha](http://ekonomika.idnes.cz/cez-tendr-temelin-dostavba-paces-dok/ekonomika.aspx?c=A140608_140703_ekonomika_aha)

- [9] Zahraniční. *Novinky.cz* [online].  
Copyright © 2003–2015 Borgis, a.s. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z  
<http://www.novinky.cz/zahranicni/amerika/345611-solarni-elektrarna-v-pousti-mojave-spaluje-ptaky-za-letu.html>
- [10] Benda, V. *Systémy pro využití solární energie*. Přednášky a učební texty, ČVUT Praha 2014
- [11] Elektrárny. *All for power* [online].  
© Copyright 2007 - 2015 AF POWER agency, a.s., ISSN 1802-8535 [cit. 2015-03-04]. Dostupné z <http://www.allforpower.cz/clanek/fond-rsj-postavil-na-trutnovsku-elektrarnu-na-biomasu-za-pul-mld>
- [12] Biomasa. ČEZ, a.s. [online]. Copyright 2015 ČEZ, a. s. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/biomasa/elektrarny-cez-spalujici-biomasu.html>
- [13] Zplyňování biomasy. *BPS Projekt* [online].  
Copyright © 2015 BPS Projekt - Bioplynové stanice, zplyňování biomasy [cit. 2015-03-04]. Dostupné z  
<http://www.bpsprojekt.cz/cs/obsah/zplynovani-biomasy>
- [14] Větrné elektrárny – Věžnice. ČEZ, a.s. [online].  
Copyright 2015 ČEZ, a. s. [cit. 2015-03-15]. Dostupné z  
<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/vitr/provozovane-vetrne-elektrarny/vetrne-elektrarny-veznice.html>
- [15] Systémy regulace. *E.B Větrná energie s.r.o.* [online]. © 2010 W.E.B Větrná energie s.r.o. [cit. 2015-03-15]. Dostupné z [http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie\\_9/systemy-regulace\\_27](http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie_9/systemy-regulace_27)
- [16] Špetlík, J. *Elektrárny*. Přednášky a učební texty, ČVUT Praha 2014

- [17] Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně. ČEZ, a.s. [online].  
Copyright 2015 ČEZ, a. s. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z  
<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/dlouhe-strane.html>
- [18] Vltavská kaskáda. Simopt, s.r.o. [online].  
© Copyright Simopt, s.r.o. 1999 – 2002 [cit. 2015-03-20]. Dostupné z  
[http://www.energyweb.cz/web/index.php?display\\_page=2&subitem=2&sl\\_mod\\_e=hrch&slovník\\_page=vltav\\_kask.html](http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=2&sl_mod_e=hrch&slovník_page=vltav_kask.html)
- [19] Vodní elektrárny ČEZ v České republice. ČEZ, a.s. [online].  
Copyright 2015 ČEZ, a. s. [cit. 2015-03-20]. Dostupné z  
<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny-cez/ceska-republika.html>
- [20] Vodní elektrárna Lipno. ČEZ, a.s. [online].  
Copyright 2015 ČEZ, a. s. [cit. 2015-03-21]. Dostupné z  
<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/lipno.html>
- [21] Pro media. ČEZ, a.s. [online]. Copyright 2015 ČEZ, a. s. [cit. 2015-03-21].  
Dostupné z <http://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/2685.html>
- [22] Large Hydro-vodní turbíny a hydrotechnická zařízení.  
ČKD Blansko Holding, a.s. [online].  
© 2014 ČKD Blansko Holding, a.s. [cit. 2015-03-21].  
Dostupné z <http://www.ckdblansko.cz/vyrobni-program/large-hydro-vodni-turbiny-a-hydrotechnicka-zarizeni>
- [23] VE MODŘANY. ENERGO - PRO, a.s. [online].  
©ENERGO- PRO a.s. [cit. 2015-03-21].  
Dostupné z <http://www.energo-pro.com/Code/?Template=OurGroupView&RecordID=2&LanguageID=2>
- [24] Voženílek, P. Elektrické stroje a přístroje 1. Přednášky a učební texty,  
ČVUT Praha 2012

- [25] Asynchronní generátor. MVE energetika [online].  
© MVE energetika [cit. 2015-03-21]. Dostupné z  
<http://mve.energetika.cz/sikovneruce/asynchronni-generator.htm>
- [26] Energetický zákon. ČEZ, a.s. [online].  
Copyright 2015 ČEZ, a. s. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z  
<http://www.cez.cz/cs/ke-stazeni/energeticka-legislativa.html>
- [27] Novela vyhlášky č. 541/2005 Sb. *Energetický regulační úřad* [online].  
© Energetický regulační úřad 2014 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z  
<http://www.eru.cz/-/bodove-zneni-novely-vyhlasky?inheritRedirect=true>
- [28] Vyhláška č. 51/2006 Sb. *Energetický regulační úřad* [online].  
© Energetický regulační úřad 2014 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z  
<http://www.eru.cz/-/vyhlaska-c-51-2006-sb-?inheritRedirect=true>
- [29] Vyhláška č. 540/2005 Sb. *Energetický regulační úřad* [online].  
© Energetický regulační úřad 2014 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z  
<http://www.eru.cz/-/vyhlaska-c-540-2005-sb-?inheritRedirect=true>
- [30] Vyhláška č. 436/2013 Sb. *Energetický regulační úřad* [online].  
© Energetický regulační úřad 2014 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z  
<http://www.eru.cz/-/vyhlaska-c-436-2013-sb-?inheritRedirect=true>
- [31] Zákon č. 165/2012 Sb. *Energetický regulační úřad* [online].  
© Energetický regulační úřad 2014 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z  
<http://www.eru.cz/-/zakon-c-165-2012-sb->
- [32] Pravidla provozování DS – 2014, příloha č. 4. ČEZ, a.s. [online].  
Copyright 2015 ČEZ, a. s. [cit. 2015-03-21]. Dostupné z  
<http://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds/ppds-2014.html>
- [33] Mapy katastr, Týnec nad Sázavou. *ikatastr.cz* [online]. [cit. 2015-05-05].  
Dostupné z <http://www.ikatastr.cz/#ilat=49.833777&ilon=14.594846>
- [34] Program E-Vlivy na modelaci ustáleného chodu sítě. Fakulta elektrotechnická, katedra elektroenergetiky K13115, ČVUT v Praze.

## 7 Přílohy

### 7.1 Ustálený chod sítě, hrubá data

Veškerá data a symboly pochází z programu E-Vlivy [34].

#### Použité zkratky a symboly

U (kV)      napětí v daném uzlu

dUn (%)      rozdíl napětí mezi jmenovitou hodnotou sítě a skutečnou hodnotou v uzlu, hodnota nesmí přesáhnout 10 %.

Zk ( $\Omega$ )      zkratová impedance daného uzlu

Sk (MVA)      zkratový výkon v daném uzlu

#### 7.1.1 Výpočet sítě bez generátoru G1

*Napětí a zkratový výkon v jednotlivých uzlech*

Uzel	U (kV)	Úhel (°)	dUn (%)	Zk (Ohm)	Úhel (°)	Sk (MVA)
U1	109,346	-0,772	0,595	6,468	89,999	2057,780
U2	22,138	-5,041	-0,625	1,674	88,238	318,040
U3	22,019	-5,228	-0,084	2,475	76,695	215,127
U4	21,984	-5,282	0,072	2,727	74,584	195,228
U5	21,932	-5,365	0,311	3,154	71,821	168,804
U6	21,866	-5,470	0,611	3,717	69,187	143,235
U7	21,866	-5,470	0,611	3,717	69,186	143,235
U8	21,866	-5,470	0,611	3,717	69,186	143,235
U9	21,845	-5,503	0,703	3,891	68,529	136,811
U10	21,738	-5,679	1,190	4,947	65,568	107,630
U11	21,730	-5,691	1,227	5,082	65,207	104,755
U12	21,708	-5,728	1,329	5,481	64,445	97,137
U13	21,701	-5,739	1,360	5,614	64,215	94,835
U14	21,694	-5,751	1,392	6,014	63,586	88,533
U15	21,864	-5,466	0,620	5,035	65,377	105,740
U16	21,865	-5,462	0,615	5,478	64,516	97,195

Tab. 7.1.1 -1 Parametry napětí, impedance a zkratových výkonů

*Proudy a výkony ve větvích*

Prvek	Uzel	I (A)	Úhel [°]	Z [Ohm]	Úhel [°]	P [kW]	Q [kVAr]	S [kVA]
<b>Benešov 110</b>	U1	158,624	155,737	5,880	90,000	-27552,228	-11975,273	30042,177
<b>T101</b>	U1	158,624	155,736	1,331	87,883	-27552,234	-11975,331	30042,206
<b>T101</b>	U2	756,971	155,895	1,331	87,883	27433,037	9479,835	29024,797
<b>V1</b>	U2	89,257	151,188	0,899	54,830	-3132,048	-1379,515	3422,394
<b>V1</b>	U3	89,272	151,166	0,899	54,830	3119,665	1363,366	3404,567
<b>Žabovřesky</b>	U3	3,414	-27,848	3723,077	22,620	120,202	50,084	130,219
<b>V2</b>	U3	85,855	151,127	0,270	54,830	-2999,393	-1313,198	3274,271
<b>V2</b>	U4	85,860	151,120	0,270	54,830	2995,957	1308,746	3269,339
<b>Lhota</b>	U4	6,818	-27,902	1861,538	22,620	239,656	99,856	259,627

V3	U4	79,045	151,035	0,450	54,830	-2756,371	-1208,974	3009,850
V3	U5	79,052	151,023	0,450	54,830	2751,516	1202,788	3002,921
Úročnice	U5	2,818	-27,167	4493,827	21,801	99,379	39,751	107,034
V4	U5	76,236	150,956	0,585	54,830	-2652,137	-1163,027	2895,939
V4	U6	76,246	150,940	0,585	54,830	2646,266	1155,605	2887,585
V5	U7	75,863	151,611	0,180	54,830	-2646,275	-1118,899	2873,100
V5	U9	75,866	151,605	0,180	54,830	2644,486	1116,640	2870,573
V6	U9	67,687	151,556	1,079	54,830	-2358,538	-998,307	2561,116
V6	U10	67,705	151,521	1,079	54,830	2349,992	987,844	2549,175
V7	U10	37,842	151,683	0,139	52,309	-1315,023	-548,427	1424,801
V7	U11	37,844	151,675	0,139	52,309	1314,657	548,160	1424,360
V8	U11	37,846	151,674	0,405	54,830	-1314,713	-548,219	1424,434
V8	U12	37,852	151,651	0,405	54,830	1313,711	547,417	1423,201
V9	U12	35,133	151,313	0,135	54,830	-1216,321	-515,262	1320,959
V9	U13	35,135	151,305	0,135	54,830	1216,033	515,060	1320,615
V10	U13	11,819	151,122	0,405	54,830	-408,496	-174,565	444,232
V10	U14	11,825	151,049	0,405	54,830	408,399	175,045	444,331
Chrást	U14	11,825	-28,949	1059,205	23,199	408,386	175,022	444,310
Týnec1	U13	23,318	-28,604	537,314	22,865	807,573	340,543	876,438
Jawa	U12	2,727	-23,991	4596,203	18,263	97,360	32,129	102,525
Brodce	U10	29,861	-28,681	420,298	23,003	1034,912	439,349	1124,309
Bukovany	U9	8,178	-27,982	1542,152	22,479	285,940	118,320	309,453
V11	U8	0,969	84,513	1,349	54,830	0,011	-36,712	36,712
V11	U15	1,025	84,514	1,349	54,830	-0,014	38,804	38,804
Týnec2	U15	2,809	-27,268	4493,827	21,801	98,764	39,506	106,372
V12	U15	2,608	-5,851	0,450	54,830	98,743	0,664	98,745
V12	U16	2,607	-5,446	0,450	54,830	-98,748	0,027	98,748
ZI1	U16	0,000	90,000	0,000	90,000	0,000	0,000	0,000
R22	U2	668,056	-23,476	19,132	18,435	24300,997	8100,333	25615,500
FVE	U16	2,608	174,538	4840,000	-180,000	-98,775	0,000	98,775

Tab. 7.1.1 -2 Proudý a výkony ve větvích

## 7.1.2 Parametry v uzlech sítě s G1 s účinníkem 0,95

Napětí v jednotlivých uzlech

Uzel	U (kV)	Úhel (°)	dUn (%)	Zk (Ohm)	Úhel (°)	Sk (MVA)
U1	109,462	-0,652	0,489	6,468	89,999	2057,780
U2	22,281	-4,238	-1,277	1,674	88,238	318,040
U3	22,317	-4,126	-1,442	2,475	76,695	215,127
U4	22,330	-4,090	-1,498	2,727	74,584	195,228
U5	22,355	-4,023	-1,612	3,154	71,821	168,804
U6	22,390	-3,933	-1,771	3,717	69,187	143,235
U7	22,390	-3,933	-1,771	3,717	69,186	143,235
U8	22,390	-3,933	-1,771	3,717	69,186	143,235
U9	22,401	-3,905	-1,821	3,891	68,529	136,811
U10	22,480	-3,720	-2,182	4,947	65,568	107,630
U11	22,497	-3,688	-2,261	5,082	65,207	104,755
U12	22,474	-3,726	-2,155	5,481	64,445	97,137
U13	22,467	-3,737	-2,122	5,614	64,215	94,835
U14	22,460	-3,749	-2,089	6,014	63,586	88,533
U15	22,388	-3,929	-1,762	5,035	65,377	105,740
U16	22,389	-3,925	-1,767	5,478	64,516	97,195

Tab. 7.1.2 -1 Parametry napětí, impedance a zkratových výkonů

Rozdíl napětí před a po připojení G1

Uzel	dU před (%)	dU po (%)	rozdíl
------	-------------	-----------	--------



U1	0,589	0,476	0,113
U2	-0,658	-1,361	0,703
U3	-0,105	-1,516	1,41
U4	0,054	-1,568	1,622
U5	0,299	-1,676	1,975
U6	0,606	-1,827	2,433
U7	0,606	-1,827	2,433
U8	0,606	-1,827	2,433
U9	0,7	-1,874	2,574
U10	1,2	-2,218	3,419
U11	1,237	-2,293	3,53
U12	1,342	-2,192	3,534
U13	1,375	-2,16	3,535
U14	1,408	-2,128	3,536
U15	0,589	0,476	0,113
U16	-0,658	-1,361	0,703

Tab. 7.1.2 -2 Posouzení připojitelnosti G1 s účínkem 0,95

## Proudy a výkony ve větvích

Prvek	Uzel	I (A)	Úhel (°)	Z (Ω)	Úhel (°)	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)
<b>Benešov 110</b>	U1	133,561	156,359	5,880	90,000	-23311,177	-9889,739	25322,281
<b>T101</b>	U1	133,561	156,359	1,331	87,883	-23311,176	-9889,788	25322,299
<b>T101</b>	U2	637,108	156,549	1,331	87,883	23217,550	8091,418	24587,103
<b>V1</b>	U2	36,381	-8,904	0,899	54,830	1399,343	114,217	1403,997
<b>V1</b>	U3	36,378	-8,845	0,899	54,830	-1401,400	-115,683	1406,166
<b>Žabovřesky</b>	U3	3,461	-26,746	3723,077	22,620	123,486	51,453	133,777
<b>V2</b>	U3	39,686	-10,381	0,270	54,830	1524,902	167,155	1534,036
<b>V2</b>	U4	39,684	-10,365	0,270	54,830	-1525,636	-167,760	1534,832
<b>Lhota</b>	U4	6,925	-26,710	1861,538	22,620	247,244	103,018	267,848
<b>V3</b>	U4	46,370	-12,772	0,450	54,830	1772,835	270,722	1793,386
<b>V3</b>	U5	46,367	-12,749	0,450	54,830	-1774,505	-272,363	1795,285
<b>Úročnice</b>	U5	2,872	-25,825	4493,827	21,801	103,249	41,300	111,203
<b>V4</b>	U5	49,169	-13,508	0,585	54,830	1877,779	313,703	1903,803
<b>V4</b>	U6	49,165	-13,480	0,585	54,830	-1880,221	-316,217	1906,627
<b>V5</b>	U7	49,338	-14,615	0,180	54,830	1880,156	354,645	1913,311
<b>V5</b>	U9	49,336	-14,606	0,180	54,830	-1880,913	-355,426	1914,200
<b>V6</b>	U9	57,574	-16,312	1,079	54,830	2181,641	479,911	2233,803
<b>V6</b>	U10	57,564	-16,267	1,079	54,830	-2187,822	-486,917	2241,350
<b>V7</b>	U10	88,110	-19,914	0,139	52,309	3294,610	956,794	3430,730
<b>V7</b>	U11	88,109	-19,911	0,139	52,309	-3296,594	-959,141	3433,291
<b>V8</b>	U11	39,182	153,676	0,405	54,830	-1409,175	-587,611	1526,781
<b>V8</b>	U12	39,188	153,653	0,405	54,830	1408,101	586,752	1525,460
<b>V9</b>	U12	36,373	153,317	0,135	54,830	-1303,714	-552,246	1415,855
<b>V9</b>	U13	36,375	153,309	0,135	54,830	1303,406	552,029	1415,487
<b>V10</b>	U13	12,236	153,125	0,405	54,830	-437,839	-187,099	476,140
<b>V10</b>	U14	12,242	153,051	0,405	54,830	437,734	187,614	476,246
<b>Chrást</b>	U14	12,242	-26,947	1059,205	23,199	437,730	187,599	476,236
<b>Týnec1</b>	U13	24,141	-26,602	537,314	22,865	865,600	365,012	939,413
<b>Jawa</b>	U12	2,823	-21,989	4596,203	18,263	104,356	34,438	109,892
<b>Brodce</b>	U10	30,880	-26,723	420,298	23,003	1106,772	469,856	1202,376
<b>Bukovany</b>	U9	8,386	-26,385	1542,152	22,479	300,658	124,410	325,381
<b>V11</b>	U8	0,993	86,057	1,349	54,830	0,007	-38,500	38,500
<b>V11</b>	U15	1,049	86,057	1,349	54,830	-0,009	40,693	40,693
<b>Týnec2</b>	U15	2,876	-25,731	4493,827	21,801	103,555	41,422	111,532
<b>V12</b>	U15	2,671	-4,344	0,450	54,830	103,578	0,750	103,580
<b>V12</b>	U16	2,671	-3,939	0,450	54,830	-103,583	-0,026	103,583
<b>ZI1</b>	U16	0,000	90,000	0,000	90,000	0,000	0,000	0,000
<b>R22</b>	U2	672,384	-22,673	19,132	18,435	24616,892	8205,630	25948,482

<b>G1</b>	U11	127,120	158,116	102,178	-161,805	-4705,746	-1546,727	4953,423
<b>FVE</b>	U16	2,671	176,075	4840,000	-180,000	-103,566	0,000	103,566

Tab. 7.1.2 -3 Proudý a výkony ve větvích

### 7.1.3. Parametry v uzlech sítě s G1 s účinnkem 0,98

#### Napětí v uzlech

Uzel	U [kV]	Úhel [°]	dUn [%]	Zk [Ohm]	Úhel [°]	Sk [MVA]
U1	109,430	-0,650	0,518	6,468	89,999	2057,780
U2	22,239	-4,229	-1,086	1,674	88,238	318,040
U3	22,256	-4,083	-1,162	2,475	76,695	215,127
U4	22,262	-4,037	-1,190	2,727	74,584	195,228
U5	22,277	-3,953	-1,259	3,154	71,821	168,804
U6	22,299	-3,840	-1,360	3,717	69,187	143,235
U7	22,299	-3,840	-1,360	3,717	69,186	143,235
U8	22,299	-3,840	-1,360	3,717	69,186	143,235
U9	22,306	-3,805	-1,393	3,891	68,529	136,811
U10	22,362	-3,579	-1,647	4,947	65,568	107,630
U11	22,377	-3,541	-1,712	5,082	65,207	104,755
U12	22,353	-3,578	-1,607	5,481	64,445	97,137
U13	22,346	-3,590	-1,574	5,614	64,215	94,835
U14	22,339	-3,601	-1,541	6,014	63,586	88,533
U15	22,297	-3,836	-1,352	5,035	65,377	105,740
U16	22,299	-3,832	-1,357	5,478	64,516	97,195

Tab. 7.1.3-1 Parametry napětí, impedance a zkratových výkonů

#### Rozdíl napětí před a po připojení G1

Uzel	dU před (%)	dU po (%)	rozdíl
U1	0,589	0,506	0,084
U2	-0,658	-1,164	0,506
U3	-0,105	-1,235	1,129
U4	0,054	-1,262	1,316
U5	0,299	-1,328	1,627
U6	0,606	-1,425	2,031
U7	0,606	-1,425	2,032
U8	0,606	-1,425	2,031
U9	0,7	-1,456	2,156
U10	1,2	-1,701	2,901
U11	1,237	-1,763	3
U12	1,342	-1,661	3,003
U13	1,375	-1,629	3,004
U14	1,408	-1,597	3,005
U15	0,615	-1,417	2,032
U16	0,589	0,506	0,084

Tab. 7.1.3 -2 Posouzení připojitelnosti G1 s účinnkem 0,98

#### Proudý a výkony ve větvích

Prvek	Uzel	I (A)	Úhel (°)	Z (Ω)	Úhel (°)	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)
<b>Benešov 110</b>	U1	134,466	155,097	5,880	90,000	-23237,183	-10468,789	25486,511

<b>T101</b>	U1	134,466	155,097	1,331	87,883	-23237,182	-10468,803	25486,515
<b>T101</b>	U2	641,389	155,282	1,331	87,883	23142,771	8647,666	24705,667
<b>V1</b>	U2	37,907	14,671	0,899	54,830	1381,413	-472,940	1460,128
<b>V1</b>	U3	37,919	14,724	0,899	54,830	-1383,647	471,216	1461,685
<b>Žabovřesky</b>	U3	3,451	-26,702	3723,077	22,620	122,804	51,168	133,038
<b>V2</b>	U3	40,570	11,500	0,270	54,830	1506,396	-420,110	1563,880
<b>V2</b>	U4	40,573	11,516	0,270	54,830	-1507,163	419,455	1564,443
<b>Lhota</b>	U4	6,904	-26,657	1861,538	22,620	245,748	102,395	266,227
<b>V3</b>	U4	46,200	6,212	0,450	54,830	1752,994	-316,957	1781,418
<b>V3</b>	U5	46,203	6,235	0,450	54,830	-1754,653	315,328	1782,762
<b>Úročnice</b>	U5	2,862	-25,754	4493,827	21,801	102,535	41,014	110,433
<b>V4</b>	U5	48,654	4,451	0,585	54,830	1857,153	-274,355	1877,309
<b>V4</b>	U6	48,657	4,479	0,585	54,830	-1859,544	271,905	1879,318
<b>V5</b>	U7	48,525	3,323	0,180	54,830	1859,578	-233,681	1874,203
<b>V5</b>	U9	48,526	3,332	0,180	54,830	-1860,310	232,933	1874,836
<b>V6</b>	U9	55,937	-0,898	1,079	54,830	2158,403	-109,604	2161,184
<b>V6</b>	U10	55,940	-0,852	1,079	54,830	-2164,238	103,072	2166,691
<b>V7</b>	U10	84,669	-9,914	0,139	52,309	3259,442	361,883	3279,470
<b>V7</b>	U11	84,669	-9,910	0,139	52,309	-3261,274	-364,036	3281,529
<b>V8</b>	U11	38,971	153,824	0,405	54,830	-1394,067	-581,294	1510,406
<b>V8</b>	U12	38,977	153,801	0,405	54,830	1393,005	580,445	1509,098
<b>V9</b>	U12	36,179	153,462	0,135	54,830	-1289,781	-546,404	1400,747
<b>V9</b>	U13	36,181	153,454	0,135	54,830	1289,476	546,190	1400,382
<b>V10</b>	U13	12,171	153,270	0,405	54,830	-433,191	-185,130	471,091
<b>V10</b>	U14	12,178	153,197	0,405	54,830	433,087	185,639	471,196
<b>Chrást</b>	U14	12,177	-26,800	1059,205	23,199	433,044	185,590	471,137
<b>Týnec1</b>	U13	24,011	-26,454	537,314	22,865	856,333	361,104	929,356
<b>Jawa</b>	U12	2,808	-21,841	4596,203	18,263	103,239	34,069	108,715
<b>Brodc</b>	U10	30,718	-26,581	420,298	23,003	1095,206	464,946	1189,811
<b>Bukov</b>	U9	8,351	-26,285	1542,152	22,479	298,134	123,366	322,650
<b>V11</b>	U8	0,989	86,163	1,349	54,830	-0,002	-38,204	38,204
<b>V11</b>	U15	1,046	86,163	1,349	54,830	-0,001	40,379	40,379
<b>Týnec2</b>	U15	2,865	-25,638	4493,827	21,801	102,722	41,089	110,634
<b>V12</b>	U15	2,660	-4,248	0,450	54,830	102,736	0,738	102,739
<b>V12</b>	U16	2,660	-3,843	0,450	54,830	-102,742	-0,019	102,742
<b>ZI1</b>	U16	0,000	90,000	0,000	90,000	0,000	0,000	0,000
<b>R22</b>	U2	671,117	-22,664	19,132	18,435	24524,179	8174,726	25850,754
<b>G1</b>	U11	122,567	164,980	105,404	-168,521	-4655,367	-945,350	4750,382
<b>FVE</b>	U16	2,660	176,168	4840,000	-180,000	-102,733	0,000	102,733

Tab. 7.1.3 -3 Proudů a výkonů ve větvích

### 7.1.4 Parametry v uzlech sítě s G1 s účinníkem 1

#### Napětí v uzlech

Uzel	U (kV)	Úhel (°)	dUn (%)	Zk (Ohm)	Úhel (°)	Sk (MVA)
U1	109,381	-0,648	0,563	6,468	89,999	2057,780
U2	22,172	-4,215	-0,782	1,674	88,238	318,040
U3	22,157	-4,015	-0,714	2,475	76,695	215,127
U4	22,154	-3,952	-0,700	2,727	74,584	195,228
U5	22,153	-3,841	-0,697	3,154	71,821	168,804
U6	22,155	-3,692	-0,705	3,717	69,187	143,235
U7	22,155	-3,692	-0,705	3,717	69,186	143,235
U8	22,155	-3,692	-0,705	3,717	69,186	143,235
U9	22,156	-3,647	-0,709	3,891	68,529	136,811
U10	22,174	-3,353	-0,792	4,947	65,568	107,630
U11	22,184	-3,307	-0,835	5,082	65,207	104,755

U12	22,161	-3,344	-0,731	5,481	64,445	97,137
U13	22,154	-3,355	-0,699	5,614	64,215	94,835
U14	22,147	-3,367	-0,666	6,014	63,586	88,533
U15	22,153	-3,689	-0,696	5,035	65,377	105,740
U16	22,154	-3,684	-0,702	5,478	64,516	97,195

Tab. 7.1.4 -1 Parametry napětí, impedance a zkratových výkonů

## Rozdíl napětí před a po připojení G1

Uzel	dU před (%)	dU po (%)	rozdíl
U1	0,589	0,554	0,036
U2	-0,658	-0,842	0,184
U3	-0,105	-0,774	0,668
U4	0,054	-0,76	0,814
U5	0,299	-0,757	1,056
U6	0,606	-0,764	1,371
U7	0,606	-0,764	1,371
U8	0,606	-0,764	1,371
U9	0,7	-0,768	1,468
U10	1,2	-0,849	2,049
U11	1,237	-0,891	2,128
U12	1,342	-0,788	2,13
U13	1,375	-0,756	2,131
U14	1,408	-0,724	2,132
U15	0,615	-0,756	1,371
U16	0,61	-0,761	1,371

Tab. 7.1.4 -2 Posouzení připojitelnosti G1 s účínkem 1

## Proudy a výkony ve větvích

Prvek	Uzel	I (A)	Úhel (°)	Z (Ω)	Úhel (°)	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)
<b>Benešov 110</b>	U1	136,071	153,128	5,880	90,000	-23125,438	-11391,617	25778,961
<b>T101</b>	U1	136,071	153,127	1,331	87,883	-23125,437	-11391,668	25778,983
<b>T101</b>	U2	648,997	153,305	1,331	87,883	23029,609	9529,680	24923,437
<b>V1</b>	U2	50,668	41,972	0,899	54,830	1347,076	-1404,110	1945,800
<b>V1</b>	U3	50,695	42,002	0,899	54,830	-1351,068	1399,880	1945,520
<b>Žabovřesky</b>	U3	3,436	-26,635	3723,077	22,620	121,719	50,716	131,862
<b>V2</b>	U3	52,045	38,479	0,270	54,830	1472,736	-1349,231	1997,342
<b>V2</b>	U4	52,053	38,488	0,270	54,830	-1473,998	1347,869	1997,354
<b>Lhota</b>	U4	6,871	-26,572	1861,538	22,620	243,370	101,404	263,651
<b>V3</b>	U4	55,302	32,018	0,450	54,830	1717,414	-1246,414	2122,041
<b>V3</b>	U5	55,313	32,033	0,450	54,830	-1719,791	1243,758	2122,408
<b>Úročnice</b>	U5	2,846	-25,643	4493,827	21,801	101,399	40,560	109,210
<b>V4</b>	U5	56,886	29,610	0,585	54,830	1821,205	-1203,176	2182,756
<b>V4</b>	U6	56,899	29,630	0,585	54,830	-1824,475	1199,469	2183,446
<b>V5</b>	U7	56,365	28,800	0,180	54,830	1824,358	-1161,896	2162,934
<b>V5</b>	U9	56,369	28,806	0,180	54,830	-1825,345	1160,782	2163,169
<b>V6</b>	U9	61,511	22,466	1,079	54,830	2119,572	-1038,960	2360,513
<b>V6</b>	U10	61,531	22,504	1,079	54,830	-2126,629	1030,666	2363,224
<b>V7</b>	U10	84,738	6,794	0,139	52,309	3203,615	-573,377	3254,521
<b>V7</b>	U11	84,739	6,798	0,139	52,309	-3205,450	571,216	3255,948
<b>V8</b>	U11	38,637	154,057	0,405	54,830	-1370,201	-571,383	1484,564
<b>V8</b>	U12	38,643	154,034	0,405	54,830	1369,157	570,548	1483,279
<b>V9</b>	U12	35,865	153,700	0,135	54,830	-1267,591	-536,926	1376,617
<b>V9</b>	U13	35,867	153,691	0,135	54,830	1267,291	536,716	1376,259
<b>V10</b>	U13	12,065	153,508	0,405	54,830	-425,710	-181,901	462,944

V10	U14	12,071	153,435	0,405	54,830	425,608	182,401	463,047
Chrást	U14	12,072	-26,565	1059,205	23,199	425,614	182,406	463,055
Týnec1	U13	23,804	-26,220	537,314	22,865	841,642	354,909	913,412
Jawa	U12	2,784	-21,607	4596,203	18,263	101,468	33,484	106,850
Brodce	U10	30,460	-26,356	420,298	23,003	1076,865	457,160	1169,886
Bukovany	U9	8,295	-26,126	1542,152	22,479	294,127	121,708	318,313
V11	U8	0,983	86,313	1,349	54,830	-0,004	-37,710	37,710
V11	U15	1,039	86,313	1,349	54,830	0,001	39,857	39,857
Týnec2	U15	2,846	-25,490	4493,827	21,801	101,398	40,559	109,209
V12	U15	2,643	-4,107	0,450	54,830	101,428	0,741	101,431
V12	U16	2,643	-3,702	0,450	54,830	-101,434	-0,031	101,434
Z11	U16	0,000	90,000	0,000	90,000	0,000	0,000	0,000
R22	U2	669,096	-22,650	19,132	18,435	24376,681	8125,561	25695,278
G1	U11	119,081	176,693	107,556	-180,000	-4575,501	0,000	4575,501
FVE	U16	2,643	176,316	4840,000	-180,000	-101,409	0,000	101,409

Tab. 7.1.4 -3 Proudý a výkony v síti s připojeným G1 s účinníkem 1

### 7.1.5. Parametry v uzlech sítě s G1 s účinníkem -0,999

#### Napětí v uzlech

Uzel	U (kV)	Úhel (°)	dUn (%)	Zk (Ohm)	Úhel (°)	Sk (MVA)
U1	109,370	-0,647	0,573	6,468	89,999	2057,780
U2	22,157	-4,213	-0,715	1,674	88,238	318,040
U3	22,135	-4,000	-0,616	2,475	76,695	215,127
U4	22,130	-3,934	-0,592	2,727	74,584	195,228
U5	22,126	-3,817	-0,574	3,154	71,821	168,804
U6	22,124	-3,660	-0,562	3,717	69,187	143,235
U7	22,124	-3,660	-0,562	3,717	69,186	143,235
U8	22,124	-3,660	-0,562	3,717	69,186	143,235
U9	22,123	-3,612	-0,560	3,891	68,529	136,811
U10	22,133	-3,304	-0,606	4,947	65,568	107,630
U11	22,142	-3,255	-0,644	5,082	65,207	104,755
U12	22,119	-3,293	-0,540	5,481	64,445	97,137
U13	22,112	-3,304	-0,508	5,614	64,215	94,835
U14	22,105	-3,316	-0,475	6,014	63,586	88,533
U15	22,122	-3,657	-0,553	5,035	65,377	105,740
U16	22,123	-3,652	-0,559	5,478	64,516	97,195

Tab. 7.1.5 -1 Parametry napětí, impedance a zkratových výkonů

#### Rozdíl napětí před a po připojení G1

Uzel	dU před (%)	dU po (%)	rozdíl
U1	0,589	0,564	0,025
U2	-0,658	-0,77	0,112
U3	-0,105	-0,671	0,566
U4	0,054	-0,648	0,702
U5	0,299	-0,629	0,928
U6	0,606	-0,617	1,223
U7	0,606	-0,617	1,223
U8	0,606	-0,617	1,223
U9	0,7	-0,614	1,314
U10	1,2	-0,659	1,859
U11	1,237	-0,697	1,934
U12	1,342	-0,594	1,936

U13	1,375	-0,562	1,936
U14	1,408	-0,529	1,937
U15	0,615	-0,608	1,223
U16	0,61	-0,614	1,223

Tab. 7.1.5 -2 Posouzení připojitelnosti G1 s účínkem -0,999

*Proudy a výkony ve větvích*

Prvek	Uzel	I (A)	Úhel (°)	Z (Ω)	Úhel (°)	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)
<b>Benešov 110</b>	U1	136,447	152,705	5,880	90,000	-23102,082	-11592,816	25847,622
<b>T101</b>	U1	136,447	152,705	1,331	87,883	-23102,083	-11592,924	25847,672
<b>T101</b>	U2	650,782	152,881	1,331	87,883	23005,917	9721,282	24975,498
<b>V1</b>	U2	54,486	45,983	0,899	54,830	1338,643	-1606,419	2091,063
<b>V1</b>	U3	54,515	46,008	0,899	54,830	-1343,259	1601,301	2090,098
<b>Žabovřesky</b>	U3	3,433	-26,620	3723,077	22,620	121,483	50,618	131,606
<b>V2</b>	U3	55,637	42,633	0,270	54,830	1464,732	-1550,705	2133,102
<b>V2</b>	U4	55,645	42,641	0,270	54,830	-1466,176	1549,086	2132,917
<b>Lhota</b>	U4	6,864	-26,554	1861,538	22,620	242,852	101,188	263,090
<b>V3</b>	U4	58,436	36,335	0,450	54,830	1709,083	-1447,829	2239,905
<b>V3</b>	U5	58,448	36,349	0,450	54,830	-1711,736	1444,778	2239,961
<b>Úročnice</b>	U5	2,843	-25,618	4493,827	21,801	101,152	40,461	108,944
<b>V4</b>	U5	59,837	33,948	0,585	54,830	1812,833	-1404,377	2293,172
<b>V4</b>	U6	59,851	33,966	0,585	54,830	-1816,450	1400,173	2293,463
<b>V5</b>	U7	59,258	33,214	0,180	54,830	1816,471	-1362,552	2270,708
<b>V5</b>	U9	59,262	33,220	0,180	54,830	-1817,562	1361,289	2270,824
<b>V6</b>	U9	63,887	26,819	1,079	54,830	2110,810	-1239,950	2448,059
<b>V6</b>	U10	63,910	26,853	1,079	54,830	-2118,424	1230,861	2450,049
<b>V7</b>	U10	85,670	10,350	0,139	52,309	3191,416	-775,277	3284,233
<b>V7</b>	U11	85,671	10,354	0,139	52,309	-3193,292	773,063	3285,535
<b>V8</b>	U11	38,563	154,108	0,405	54,830	-1365,003	-569,209	1478,929
<b>V8</b>	U12	38,570	154,085	0,405	54,830	1363,963	568,377	1477,649
<b>V9</b>	U12	35,801	153,746	0,135	54,830	-1262,909	-535,064	1371,580
<b>V9</b>	U13	35,803	153,738	0,135	54,830	1262,610	534,855	1371,224
<b>V10</b>	U13	12,042	153,559	0,405	54,830	-424,102	-181,215	461,196
<b>V10</b>	U14	12,049	153,486	0,405	54,830	424,001	181,713	461,298
<b>Chrást</b>	U14	12,049	-26,514	1059,205	23,199	424,001	181,715	461,299
<b>Týnec1</b>	U13	23,759	-26,169	537,314	22,865	838,451	353,564	909,949
<b>Jawa</b>	U12	2,778	-21,556	4596,203	18,263	101,083	33,357	106,445
<b>Brodce</b>	U10	30,404	-26,307	420,298	23,003	1072,881	455,468	1165,558
<b>Bukovany</b>	U9	8,282	-26,092	1542,152	22,479	293,255	121,347	317,370
<b>V11</b>	U8	0,981	86,329	1,349	54,830	0,007	-37,592	37,592
<b>V11</b>	U15	1,037	86,330	1,349	54,830	-0,009	39,733	39,733
<b>Týnec2</b>	U15	2,842	-25,458	4493,827	21,801	101,110	40,444	108,899
<b>V12</b>	U15	2,639	-4,046	0,450	54,830	101,100	0,687	101,103
<b>V12</b>	U16	2,639	-3,641	0,450	54,830	-101,106	0,020	101,106
<b>Z11</b>	U16	0,000	90,000	0,000	90,000	0,000	0,000	0,000
<b>R22</b>	U2	668,655	-22,647	19,132	18,435	24344,562	8114,854	25661,421
<b>G1</b>	U11	118,974	179,307	107,448	177,437	-4558,155	204,003	4562,718
<b>FVE</b>	U16	2,639	176,348	4840,000	-180,000	-101,121	0,000	101,121

Tab. 7.1.5 -3 Proudy a výkony ve větvích

### 7.1.6 Parametry v uzlech sítě s G1 s účínkem -0,98

#### Napětí v uzlech

Uzel	U (kV)	Úhel (°)	dUn (%)	Zk (Ohm)	Úhel (°)	Sk (MVA)
U1	109,332	-0,645	0,608	6,468	89,999	2057,780
U2	22,106	-4,203	-0,482	1,674	88,238	318,040
U3	22,060	-3,950	-0,273	2,475	76,695	215,127
U4	22,048	-3,871	-0,216	2,727	74,584	195,228
U5	22,031	-3,733	-0,143	3,154	71,821	168,804
U6	22,013	-3,548	-0,060	3,717	69,187	143,235
U7	22,013	-3,548	-0,060	3,717	69,186	143,235
U8	22,013	-3,548	-0,060	3,717	69,186	143,235
U9	22,008	-3,492	-0,035	3,891	68,529	136,811
U10	21,989	-3,132	0,049	4,947	65,568	107,630
U11	21,994	-3,076	0,028	5,082	65,207	104,755
U12	21,971	-3,113	0,131	5,481	64,445	97,137
U13	21,964	-3,125	0,163	5,614	64,215	94,835
U14	21,957	-3,136	0,195	6,014	63,586	88,533
U15	22,011	-3,545	-0,051	5,035	65,377	105,740
U16	22,012	-3,540	-0,056	5,478	64,516	97,195

Tab. 7.1.6 -1 Parametry napětí, impedance a zkratových výkonů

#### Rozdíl napětí před a po připojení G1

Uzel	dU před (%)	dU po (%)	rozdíl
U1	0,589	0,608	0,018
U2	-0,658	-0,482	0,176
U3	-0,105	-0,273	0,167
U4	0,054	-0,216	0,27
U5	0,299	-0,143	0,442
U6	0,606	-0,06	0,666
U7	0,606	-0,06	0,666
U8	0,606	-0,06	0,666
U9	0,7	-0,035	0,735
U10	1,2	0,049	1,151
U11	1,237	0,028	1,21
U12	1,342	0,131	1,211
U13	1,375	0,163	1,212
U14	1,408	0,195	1,212
U15	0,615	-0,051	0,666
U16	0,61	-0,056	0,666

Tab. 7.1.6 -2 Posouzení připojitelnosti G1 s účínkem -0,98

#### Proudy a výkony ve větvích

Prvek	Uzel	I (A)	Úhel (°)	Z (Ω)	Úhel (°)	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)
<b>Benešov 110</b>	U1	137,837	151,245	5,880	90,000	-23023,035	-12298,506	26101,981
<b>T101</b>	U1	137,838	151,244	1,331	87,883	-23023,036	-12298,618	26102,034
<b>T101</b>	U2	657,385	151,414	1,331	87,883	22925,611	10391,020	25170,557
<b>V1</b>	U2	69,394	56,344	0,899	54,830	1306,450	-2313,644	2657,021
<b>V1</b>	U3	69,426	56,360	0,899	54,830	-1313,936	2304,444	2652,714
<b>Žabovřesky</b>	U3	3,421	-26,570	3723,077	22,620	120,655	50,273	130,710
<b>V2</b>	U3	69,930	53,577	0,270	54,830	1434,599	-2254,185	2671,970
<b>V2</b>	U4	69,940	53,582	0,270	54,830	-1436,879	2251,375	2670,826

<b>Lhota</b>	U4	6,838	-26,491	1861,538	22,620	241,039	100,433	261,125
<b>V3</b>	U4	71,436	48,171	0,450	54,830	1677,924	-2150,917	2727,980
<b>V3</b>	U5	71,451	48,180	0,450	54,830	-1681,890	2145,998	2726,548
<b>Úročnice</b>	U5	2,831	-25,534	4493,827	21,801	100,286	40,115	108,012
<b>V4</b>	U5	72,296	46,028	0,585	54,830	1782,131	-2105,935	2758,796
<b>V4</b>	U6	72,315	46,040	0,585	54,830	-1787,412	2099,362	2757,202
<b>V5</b>	U7	71,574	45,534	0,180	54,830	1787,412	-2062,136	2728,965
<b>V5</b>	U9	71,580	45,538	0,180	54,830	-1789,004	2060,159	2728,515
<b>V6</b>	U9	74,603	39,525	1,079	54,830	2079,237	-1940,049	2843,768
<b>V6</b>	U10	74,633	39,550	1,079	54,830	-2089,620	1927,010	2842,513
<b>V7</b>	U10	91,318	22,007	0,139	52,309	3148,536	-1477,489	3477,967
<b>V7</b>	U11	91,320	22,010	0,139	52,309	-3150,668	1474,942	3478,816
<b>V8</b>	U11	38,304	154,289	0,405	54,830	-1346,790	-561,572	1459,180
<b>V8</b>	U12	38,310	154,266	0,405	54,830	1345,763	560,751	1457,917
<b>V9</b>	U12	35,560	153,928	0,135	54,830	-1246,043	-527,847	1353,235
<b>V9</b>	U13	35,562	153,920	0,135	54,830	1245,748	527,640	1352,883
<b>V10</b>	U13	11,961	153,739	0,405	54,830	-418,453	-178,800	455,052
<b>V10</b>	U14	11,968	153,666	0,405	54,830	418,353	179,292	455,154
<b>Chras</b>	U14	11,968	-26,335	1059,205	23,199	418,361	179,298	455,163
<b>Týnec</b>	U13	23,601	-25,989	537,314	22,865	827,299	348,861	897,846
<b>Jawa</b>	U12	2,760	-21,376	4596,203	18,263	99,739	32,914	105,029
<b>Brodce</b>	U10	30,206	-26,135	420,298	23,003	1058,955	449,556	1150,429
<b>Bukovany</b>	U9	8,239	-25,971	1542,152	22,479	290,205	120,085	314,069
<b>V11</b>	U8	0,976	86,435	1,349	54,830	0,011	-37,211	37,211
<b>V11</b>	U15	1,032	86,436	1,349	54,830	-0,013	39,331	39,331
<b>Týnec2</b>	U15	2,828	-25,346	4493,827	21,801	100,102	40,041	107,813
<b>V12</b>	U15	2,626	-3,937	0,450	54,830	100,095	0,685	100,097
<b>V12</b>	U16	2,625	-3,532	0,450	54,830	-100,100	0,015	100,100
<b>Z11</b>	U16	0,000	90,000	0,000	90,000	0,000	0,000	0,000
<b>R22</b>	U2	667,108	-22,638	19,132	18,435	24232,057	8077,353	25542,831
<b>G1</b>	U11	120,472	-171,597	105,404	168,521	-4497,525	913,298	4589,318
<b>FVE</b>	U16	2,626	176,460	4840,000	-180,000	-100,113	0,000	100,113

Tab. 7.1.6 -3 Proudy a výkony ve větvích

### 7.1.7 Parametry v uzlech sítě s G1 s účinníkem -0,95

#### Napětí v uzlech

Uzel	U (kV)	Úhel (°)	dUn (%)	Zk (Ohm)	Úhel (°)	Sk (MVA)
U1	109,302	-0,644	0,635	6,468	89,999	2057,780
U2	22,066	-4,197	-0,300	1,674	88,238	318,040
U3	22,001	-3,911	-0,003	2,475	76,695	215,127
U4	21,983	-3,822	0,079	2,727	74,584	195,228
U5	21,957	-3,667	0,196	3,154	71,821	168,804
U6	21,926	-3,461	0,335	3,717	69,187	143,235
U7	21,926	-3,461	0,335	3,717	69,186	143,235
U8	21,926	-3,461	0,335	3,717	69,186	143,235
U9	21,917	-3,398	0,376	3,891	68,529	136,811
U10	21,876	-2,997	0,564	4,947	65,568	107,630
U11	21,878	-2,935	0,555	5,082	65,207	104,755
U12	21,855	-2,973	0,657	5,481	64,445	97,137
U13	21,848	-2,984	0,689	5,614	64,215	94,835
U14	21,841	-2,995	0,722	6,014	63,586	88,533
U15	21,924	-3,458	0,343	5,035	65,377	105,740
U16	21,926	-3,453	0,338	5,478	64,516	97,195

Tab 7.1.7 -1 Parametry napětí, impedance a zkratových výkonů



## Rozdíl napětí před a po připojení G1

Uzel	dU před (%)	dU po (%)	rozdíl
U1	0,589	0,635	0,046
U2	-0,658	-0,3	0,358
U3	-0,105	-0,003	0,102
U4	0,054	0,079	0,025
U5	0,299	0,196	0,103
U6	0,606	0,335	0,272
U7	0,606	0,335	0,272
U8	0,606	0,335	0,272
U9	0,7	0,376	0,324
U10	1,2	0,564	0,637
U11	1,237	0,555	0,683
U12	1,342	0,657	0,685
U13	1,375	0,689	0,685
U14	1,408	0,722	0,686
U15	0,615	0,343	0,272
U16	0,61	0,338	0,272

Tab. 7.1.7 -2 Posouzení připojitelnosti G1 s účínkem -0,95

## Proudy a výkony ve větvích

Prvek	Uzel	I (A)	Úhel (°)	Z (Ω)	Úhel (°)	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)
<b>Benešov 110</b>	U1	139,005	150,123	5,880	90,000	-22964,179	-12851,833	26315,834
<b>T101</b>	U1	139,005	150,123	1,331	87,883	-22964,182	-12851,810	26315,825
<b>T101</b>	U2	662,931	150,288	1,331	87,883	22865,685	10913,733	25336,715
<b>V1</b>	U2	82,103	61,763	0,899	54,830	1278,315	-2865,744	3137,926
<b>V1</b>	U3	82,137	61,774	0,899	54,830	-1288,795	2852,289	3129,944
<b>Žabovřesky</b>	U3	3,412	-26,531	3723,077	22,620	120,007	50,003	130,008
<b>V2</b>	U3	82,308	59,399	0,270	54,830	1408,824	-2802,261	3136,471
<b>V2</b>	U4	82,318	59,402	0,270	54,830	-1411,983	2798,202	3134,267
<b>Lhota</b>	U4	6,818	-26,442	1861,538	22,620	239,620	99,842	259,588
<b>V3</b>	U4	83,092	54,709	0,450	54,830	1651,553	-2698,421	3163,716
<b>V3</b>	U5	83,108	54,716	0,450	54,830	-1656,918	2691,511	3160,634
<b>Úročnice</b>	U5	2,821	-25,469	4493,827	21,801	99,609	39,844	107,283
<b>V4</b>	U5	83,634	52,810	0,585	54,830	1756,577	-2651,606	3180,656
<b>V4</b>	U6	83,654	52,819	0,585	54,830	-1763,644	2642,490	3176,979
<b>V5</b>	U7	82,847	52,446	0,180	54,830	1763,626	-2605,574	3146,329
<b>V5</b>	U9	82,853	52,449	0,180	54,830	-1765,759	2602,827	3145,252
<b>V6</b>	U9	84,895	47,018	1,079	54,830	2053,573	-2483,748	3222,758
<b>V6</b>	U10	84,929	47,037	1,079	54,830	-2067,018	2466,348	3217,986
<b>V7</b>	U10	98,006	29,981	0,139	52,309	3115,171	-2021,322	3713,494
<b>V7</b>	U11	98,009	29,984	0,139	52,309	-3117,626	2018,354	3713,939
<b>V8</b>	U11	38,104	154,429	0,405	54,830	-1332,671	-555,724	1443,898
<b>V8</b>	U12	38,110	154,406	0,405	54,830	1331,656	554,912	1442,648
<b>V9</b>	U12	35,370	154,071	0,135	54,830	-1232,883	-522,228	1338,926
<b>V9</b>	U13	35,372	154,063	0,135	54,830	1232,591	522,024	1338,578
<b>V10</b>	U13	11,900	153,875	0,405	54,830	-414,095	-176,974	450,327
<b>V10</b>	U14	11,907	153,802	0,405	54,830	413,996	177,461	450,427
<b>Chrást</b>	U14	11,905	-26,194	1059,205	23,199	413,960	177,411	450,375
<b>Týnec1</b>	U13	23,476	-25,848	537,314	22,865	818,596	345,191	888,401
<b>Jawa</b>	U12	2,745	-21,235	4596,203	18,263	98,689	32,567	103,924
<b>Brodce</b>	U10	30,050	-26,000	420,298	23,003	1048,084	444,941	1138,619
<b>Bukovany</b>	U9	8,205	-25,877	1542,152	22,479	287,822	119,099	311,490
<b>V11</b>	U8	0,972	86,538	1,349	54,830	0,001	-36,929	36,929
<b>V11</b>	U15	1,028	86,538	1,349	54,830	-0,003	39,033	39,033
<b>Týnec2</b>	U15	2,817	-25,259	4493,827	21,801	99,314	39,726	106,965
<b>V12</b>	U15	2,615	-3,835	0,450	54,830	99,288	0,654	99,290
<b>V12</b>	U16	2,615	-3,430	0,450	54,830	-99,293	0,040	99,293

<b>ZI1</b>	U16	0,000	90,000	0,000	90,000	0,000	0,000	0,000
<b>R22</b>	U2	665,895	-22,632	19,132	18,435	24143,998	8048,000	25450,008
<b>G1</b>	U11	123,620	-164,740	102,178	161,805	-4450,210	1462,735	4684,439
<b>FVE</b>	U16	2,615	176,547	4840,000	-180,000	-99,325	0,000	99,325

*Tab. 7.1.7 -3 Proudý a výkony ve větvích pro účinník generátoru -0,95*