



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

# MOŽNOSTI OVLIVNĚNÍ JALOVÉHO VÝKONU V PŘEDÁVACÍM BODĚ DS/PS POMOCÍ REGULACE ÚČINÍKU OZE

REACTIVE POWER CHANGES AT THE TSO-DSO INTERCONNECTION POINT BY RES  
POWER FACTOR REGULATION

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Pololáník

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**  
Ústav elektroenergetiky

**Student:** Pavel Pololánik

**ID:** 186166

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### Možnosti ovlivnění jalového výkonu v předávacím bodě DS/PS pomocí regulace účinníku OZE

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teoretický rozbor vlivu jalového výkonu na provoz ES
2. Analýza toků jalového výkonu v napájecích oblastech Sokolnice, Čebín na úrovni DS 110 kV a 22 kV
3. Popis možností řízení OZE instalovaných do hladiny VN v DS s ohledem na kompenzaci jalového výkonu v předávacích místech DS s PS
4. Vyhodnocení vlivu regulace účinníku vybraných OZE na jalový výkon v předávacím bodě DS s PS a na provoz DS v zadaných oblastech
5. Návrh opatření pro řízení OZE za účelem kompenzace přetoků jalového výkonu mezi DS a PS s využitím dálkového ovládání OZE z dispečerského řídicího systému

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Literatura dle pokynů vedoucího práce a konzultanta z E.ON.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 27.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

POLOLÁNÍK, P. *Možnosti ovlivnění jalového výkonu v předávacím bodě DS/PS pomocí regulace účinníku OZE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 61 s. Vedoucí práce Michal Ptáček.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Možnosti ovlivnění jalového výkonu v předávacím bodě DS/PS pomocí regulace účinníku OZE jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 27. 5. 2019

.....

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Ptáčkovi, Ph.D. za odborné rady a věcné připomínky při vypracovávání bakalářské práce.

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá především problematikou dlouhodobého vývoje toků činné, a především jalové energie na úrovni distribučních transformátorů 110/22 kV v rámci distribuční sítě E.ON. Srovnává dvě charakterem odlišné oblasti (město vs. venkov), lišící se v použitém typu distribučního vedení a skladbou decentrálních zdrojů. Dále popisuje aktuální možnosti řízení decentrálních zdrojů instalovaných do hladiny 22 kV s ohledem na kompenzaci jalového výkonu.

V práci jsou předloženy navržené způsoby a podmínky pro dálkové hromadné řízení účinníku decentrálních zdrojů. Je uvedeno vyhodnocení již provedené zkoušky, jejímž cílem bylo ověření možností ovlivnění jalového výkonu v předávacím bodě distribuční a přenosové soustavy. V práci byly analyzovány faktory způsobující dodávku (přetok) jalového výkonu z distribuční do přenosové soustavy. Tato analýza bude základem k budoucímu využívání hromadné regulace jalového výkonu.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Decentralizované zdroje, obnovitelné zdroje, činný výkon, jalový výkon, účinník, hromadná regulace účinníku, ovlivnění jalového výkonu.

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with the long-term development of active, and primarily reactive energy flow at 110/22 kV distribution transformation points in the E. ON distribution network. It compares two different areas (city vs. countryside), differing in type of used distribution network and in composition of decentralized energy resources. Another point of this thesis is to describe current controlling possibilities for decentralized resources installed to the voltage level of 22 kV considering reactive power compensation.

This thesis introduces proposed methods and conditions used in remote mass controlling of power factor of decentralized resources. There is mentioned an evaluation of an already performed test whose purpose was to verify possibility of influencing reactive power at the interconnection point between distribution and transmission system. The factors causing the overflow reactive power were analysed. In this thesis were analysed factors, which causing overflow reactive power from distribution to the transmission system. This analysis will be the basis for future use of mass reactive power regulation.

**KEY WORDS:** Decentralized resources, renewable resources, active power, reactive power, power factor, power factor regulation, influencing reactive power

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ.....</b>	<b>11</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK.....</b>	<b>13</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>15</b>
<b>2 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA .....</b>	<b>16</b>
2.1.1 EVROPSKÁ SÍŤ PROVOZOVATELŮ ELEKTROENERGETICKÝCH PŘENOSOVÝCH SOUSTAV .....	16
2.1.2 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA ČR.....	17
<b>2.2 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA .....</b>	<b>19</b>
2.2.1 PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY .....	19
2.2.2 TRANSFORMAČNÍ STANICE PS/DS .....	19
<b>2.3 PRVKY OVLIVŇUJÍCÍ VELIKOST JALOVÉHO VÝKONU .....</b>	<b>20</b>
2.3.1 KOMPENZAČNÍ TLUMIVKY V SÍTÍCH VVN A ZVN.....	20
2.3.2 VENKOVNÍ VEDENÍ .....	20
2.3.3 KABELOVÉ VEDENÍ .....	20
2.3.4 SYNCHRONNÍ KOMPENZÁTORY .....	20
2.3.5 SYNCHRONNÍ GENERÁTORY .....	21
2.3.6 TRANSFORMÁTORY .....	21
2.3.7 ASYNCHRONNÍ MOTOR .....	21
2.3.8 ZHÁŠECÍ TLUMIVKA.....	21
<b>3 TEORIE ELEKTRICKÝCH VÝKONŮ.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 KONCEPCE VOLBY Kladných směrů .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2 ZDÁNlivý výkon .....</b>	<b>23</b>
<b>3.3 Činný výkon.....</b>	<b>24</b>
<b>3.4 JALOVÝ VÝKON .....</b>	<b>24</b>
<b>3.5 Účinník .....</b>	<b>24</b>
3.5.1 Vliv účinníku v energetice .....	24
<b>3.6 Ferrantioho jev .....</b>	<b>25</b>
<b>3.7 Přirozený výkon vedení .....</b>	<b>25</b>
<b>3.8 Regulace napětí jalovým výkonem .....</b>	<b>26</b>
<b>4 DECENTRALIZOVANÉ ZDROJE ENERGIE.....</b>	<b>29</b>
4.1.1 Obnovitelné zdroje energie v České republice .....	29
4.1.2 Kogenerační zdroje energie .....	30
4.1.3 Přehled instalovaných zdrojů do sítě 22 kV ve zvolených oblastech .....	30
4.1.4 Rozvoj FVE na distribučním území E.ON.....	31
4.1.5 Řízení a regulace z dispečerského řídicího systému .....	31
4.1.6 Automatická regulace účinníku a napětí decentralních zdrojů.....	32
4.1.7 Používané způsoby regulace $Q$ zdrojů .....	33
4.1.8 Vliv zdroje VN bez regulace $Q$ na napětí.....	33

---

4.1.9 VÝZNAMNÉ TEPELNÉ ELEKTRÁRNY V OBLASTI BRNO .....	34
<b>5 HROMADNÁ REGULACE JALOVÉHO VÝKONU DECE.....</b>	<b>36</b>
<b>5.1 NÁVRH HROMADNÝCH POVELŮ .....</b>	<b>36</b>
<b>5.2 PODMÍNKY PRO ŘÍZENÍ.....</b>	<b>38</b>
<b>6 ZKOUŠKA OVLIVNĚNÍ JALOVÉHO VÝKONU.....</b>	<b>39</b>
<b>6.1 HARMONOGRAM ZKOUŠKY .....</b>	<b>39</b>
<b>6.2 VYHODNOCENÍ.....</b>	<b>39</b>
<b>7 ANALÝZA NA ÚROVNI ROZVODEN 110/22 KV .....</b>	<b>42</b>
<b>7.1 ANALÝZA DODANÉ ENERGIE NA CELÉM DISTRIBUČNÍM ÚZEMÍ E.ON .....</b>	<b>42</b>
<b>7.2 POPIS ANALYZOVANÝCH OBLASTÍ .....</b>	<b>43</b>
7.2.1 OBLAST 1 .....	43
7.2.2 OBLAST 2 .....	44
<b>7.3 ANALÝZA TOKŮ ČINNÉ A JALOVÉ ENERGIE .....</b>	<b>44</b>
<b>7.4 ANALÝZA ČINNÉHO A JALOVÉHO VÝKONU .....</b>	<b>49</b>
<b>8 ZÁVĚR.....</b>	<b>52</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>54</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>56</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1</i> Soustava ENTSO-E a její propojení s nečlenskými státy [5] .....	16
<i>Obr. 2-2</i> Přenosová soustava ČR [7] .....	18
<i>Obr. 2-3</i> Územní působnost distribučních společností a napájecí body z PS [8] .....	19
<i>Obr. 2-4</i> Schématické zapojení zhášecí tlumivky v rozvodně Klobouky (KB) [13].....	22
<i>Obr. 3-1</i> Vektorový diagram činného, jalového a zdánlivého výkonu .....	23
<i>Obr. 3-2</i> Zjednodušené schéma [10] .....	26
<i>Obr. 3-3</i> Fázorový diagram pro zjednodušený přenos [11] .....	27
<i>Obr. 3-4</i> Fázorový diagram pro zjednodušený přenos s kompenzací [11] .....	27
<i>Obr. 3-5</i> Fázorový diagram pro zjednodušený překompenzovaný přenos [11].....	28
<i>Obr. 4-1</i> Regulace FVE Tuřany [13] .....	31
<i>Obr. 4-2</i> Využití PQ diagramu pro regulaci U/Q [1] .....	32
<i>Obr. 4-3</i> Zjednodušený princip funkce automatické regulace účinníku [13].....	33
<i>Obr. 4-4</i> Vliv zdroje VN bez regulace Q na napětí podél vedení [1] .....	34
<i>Obr. 5-1</i> Zjednodušený návrh dynamických dopočtů pro SO T402 v DŘS .....	37
<i>Obr. 5-2</i> Návrh vzhledu hromadné regulace v DŘS.....	38
<i>Obr. 6-1</i> Vývoj jalového výkonu na T402 v nedělní dny [13] .....	40
<i>Obr. 6-2</i> Vývoj činného a jalového výkonu DECE v oblasti T402 [13].....	40
<i>Obr. 6-3</i> Průběh jalového výkonu a sdruženého napětí SO T402 v čase zkoušky [13].....	41
<i>Obr. 7-1</i> Vývoj činné a jalové energie mezi 2011-2017 v oblasti 1 .....	45
<i>Obr. 7-2</i> Vývoj činné a jalové energie mezi 2011-2017 v oblasti 2 .....	45
<i>Obr. 7-3</i> Detailní vývoj jalové energie mezi 2011-2017 v oblasti 1.....	46
<i>Obr. 7-4</i> Detailní vývoj jalové energie mezi 2011-2017 v oblasti 2.....	46
<i>Obr. 7-5</i> Vývoj činné a jalové energie v roce 2011 oblast 1 .....	47
<i>Obr. 7-6</i> Vývoj činné a jalové energie v roce 2017 oblast 1 .....	47
<i>Obr. 7-7</i> Vývoj činné a jalové energie v roce 2011 oblast 2 .....	48
<i>Obr. 7-8</i> Vývoj činné a jalové energie v roce 2017 oblast 2 .....	48
<i>Obr. 7-9</i> Průběh činného a jalového výkonu na jednotlivých TR rozvodny BNO v zimním zatížení .....	49
<i>Obr. 7-10</i> Průběh činného a jalového výkonu na jednotlivých TR rozvodny BNO v letním zatížení .....	50
<i>Obr. 7-11</i> Průběh činného a jalového výkonu na TR rozvodny HU v zimním zatížení.....	51
<i>Obr. 7-12</i> Průběh činného a jalového výkonu na TR rozvodny HU v letním zatížení.....	51
<i>Obr. A-1</i> Fázorový diagram a okamžitý průběh napětí, proudu indukčního charakteru [1].....	57

---

<i>Obr. A-2 Fázorový diagram a okamžitý průběh napětí a proudu kapacitního charakteru [1] .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. A-3 Fázorový diagram a okamžitý průběh napětí a proudu [1] .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. B-4 Zjednodušené schéma T článku.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. B-5 Zjednodušené schéma T-článku se zanedbanou podélnou větví .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. B-6 Fázový diagram.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. C-7 P, Q diagram generátoru HTM-110z04 [13] .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. C-8. P, Q diagram generátoru Škoda TG 20 [13] .....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. C-9. P, Q diagram generátoru TLRI 86/29 [13] .....</i>	<i>61</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 4-1 Celkový přehled decentralizovaných zdrojů v oblasti 1, k 31. 12. 2017 [13] .....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 4-2 Celkový přehled decentralizovaných zdrojů v oblasti 2, k 31. 12. 2017 [13] .....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 6-1 Vybrané zdroje v oblasti T402 s dálkovou regulací Q [13] .....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 7-1 Měsíční maxima zatížení distribuční soustavy [13].....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 7-2 Celková dodaná energie na celém distribučním území [13] .....</i>	<i>43</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ

Veličina	Jednotka	Význam
$\cos(\varphi)$	(-)	Účinník
$f$	(Hz)	Frekvence
$f_N$	(Hz)	Jmenovitá frekvence
$i_0$	(A)	Proud naprázdno
$n$	(ot/min)	Otáčky
$t$	(s)	Čas
$t_K$	(°C)	Teplota studeného vzduchu
$u_K$	(V)	Napětí nakrátko
$\delta$	(°)	Úhel
$\varphi$	(°)	Úhel
$B_C$	(S)	Susceptance
$C$	(F)	Kapacita
$E_{\check{c}}$	(MWh)	Činná energie
$E_{DECE}$	(MWh)	Celková činná energie z obnovitelných zdrojů
$E_Q$	(Mvarh)	Celková jalová energie
$E_{Q-}$	(Mvarh)	Množství dodané jalové energie
$E_{Q+}$	(Mvarh)	Množství celkové odebrané energie
$E_{TR}$	(MWh)	Celková činná energie dodaná transformátory
$I$	(A)	Proud
$I_c$	(A)	Kapacitní proud
$I_N$	(A)	Jmenovitý proud
$I_{nab}$	(A)	Nabíjecí proud
$L$	(H)	Indukčnost
$N$	(-)	Obecný počet prvků
$P$	(W)	Činný výkon
$P_D$	(kW)	Požadovaný činný výkon výroby
$P_i$	(kW)	Instalovaný činný výkon
$P_P$	(W)	Přirozený výkon
$Q$	(va)	Jalový výkon
$Q_{CK}$	(va)	Nabíjecí jalový výkon

---

$R$	( $\Omega$ )	Odpor
$S$	(VA)	Zdánlivý výkon
$S_{MAX}$	(VA)	Maximální zdánlivý výkon
$S_N$	(VA)	Jmenovitý zdánlivý výkon
$U$	(V)	Napětí
$U_f$	(V)	Fázové napětí
$U_N$	(V)	Jmenovité napětí
$U_S$	(V)	Sdružené napětí
$W_e$	(J)	Elektrostatická energie
$W_m$	(J)	Magnetická energie
$X$	( $\Omega$ )	Reaktance
$X_L$	( $\Omega$ )	Reaktance indukčního charakteru
$Z_V$	( $\Omega$ )	Vlnová impedance
$\Delta Q$	(va)	Jalové ztráty
$\Delta Q_0$	(va)	Jalové ztráty naprázdno
$\Delta Q_K$	(va)	Jalový příkon nakrátko
$\Delta Q_P$	(va)	Jalový příkon
$\Delta U$	(V)	Úbytek napětí

**SEZNAM ZKRATEK**

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
50Hertz	Německý provozovatel přenosové soustavy z něm. 50Hertz Transmission GmbH
A	Rakouská republika
APG	Rakouský provozovatel přenosové soustavy z něm. Austrian Power Grid
ARN	Automatická regulace napětí
BNC	Brno-Černovice
BNO	Brno-Opuštěná
BNT	Brno-Teplárna
BPE	Bioplynová elektrárna
CML	Brno-Červený Mlýn
CNT	Čebín
Core CCR	Region pro výpočet kapacit z angl. Capacity Calculation Region
ČR	Česká republika
D	Německo
DECE	Decentralizované zdroje energie
DŘS	Dispečerský řídicí systém
DS	Distribuční soustava
DTS	Distribuční transformátor
DÚ	Distribuční území
ENTSO-E	Evropská síť provozovatelů elektroenergetických přenosových soustav z angl. European Network of Transmission System Operators for Electricity
ES	Elektrizační soustava
EU	Evropská unie
FVE	Fotovoltaická elektrárna
G	Generátor
HRT	Hladinová regulace transformátoru
HU	Hustopeče
$I_m$	Imaginární osa
ind.	Induktivní charakter
kap.	Kapacitní charakter
KB	Klobouky
KGE	Kogenerační elektrárna
LDS	Lokální distribuční soustava
MEY	Brno-Medlánky

---

MTTP	Monitorování bodu maximálního výkonu z angl. Maximum Power Point Tracking
NN	Nízké napětí
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PÁ	Pátek
PDS	Provozovatel distribuční sítě
PL	Polská republika
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
PPS	Provozovatel přenosové sítě
PS	Přenosová soustava
PSE S.A.	Polský provozovatel přenosové soustavy z pol. Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.
PST	Regulační fázové transformátory z angl. Phase-shifting transformers
$R_e$	Reálná osa
SEPS, a. s.	Provozovatel slovenské přenosové soustavy ze sl. Slovenská elektrizačná prenosová sústava, a.s.
SK	Slovenská republika
SK	Synchronní kompenzátor
SO	Sokolnice
ST	Středa
T101	Transformátor 101
TPE	Tepelné elektrárny
TR	Transformátor
Tzv.	Takzvaně
ÚT	Úterý
VE	Vodní elektrárna
VN	Vysoké napětí
VTE	Větrná elektrárna
VVN	Velmi vysoké napětí
ZVN	Zvláště vysoké napětí

# 1 ÚVOD

Centralizovaná energetika se postupně mění na decentralizovanou. Vnořené rozptýlené zdroje mohou způsobovat, že elektrická energie již neteče pouze z přenosové sítě (PS) přes distribuční síť (DS) ke spotřebiteli na nižších napěťových hladinách, ale dochází i ke zpětným tokům činné a jalové energie zpět do vyšších napěťových hladin.

Případné změny toků činné energie jsou závislé zejména na poměru velikosti instalovaného výkonu zdroje a velikosti příkonu spotřebičů instalovaných v dané DS, resp. zejména tomu odpovídající soudobosti vyrobené a spotřebované energie. Z pohledu toků jalové energie je pak zásadní skutečnost, že rozptýlené zdroje energie využívají v mnoha případech pro stabilizaci napětí v místě připojení právě jalový výkon [1]. Dalším faktorem ovlivňující hlavně toky jalové energie jsou změny v infrastruktuře rozvodu, kde dochází větší míře k použití kabelových vedení.

Obecně lze uvažovat, že v elektrizační soustavě jsou dodávky jalové energie do nadřazené soustavy velmi problematické. V přenosové soustavě tyto přetoky způsobují zvýšené napětí a znesnadňují regulaci. Provozovatelé přenosových sítí (PPS), ale i provozovatelé distribučních sítí (PDS) se obecně snaží snížit velikost přenášené jalové energie, jelikož přenos velkého množství jalové energie je obecně nežádoucí jev mající technické i ekonomické konsekvence.

Jednou z možností, jak snížit (regulovat) dodávky jalové energie do přenosové soustavy, je zavedení hromadné regulace dodávky/odběru jalového výkonu decentrálních zdrojů energie. Před samotným zavedením hromadné regulace je nezbytné zkušebně ověřit vliv regulace na provoz elektrizační soustavy (ES). Analýzou současného stavu sítí, jsou následně poskytnuty důležité informace pro správné návrhy odpovídajících způsobů technických řešení.





ENTSO-E přispívá k dosažení těchto cílů zejména prostřednictvím [4]:

- Vypracováním síťové kodexu a jeho implementací
- Technická spolupráce mezi provozovateli přenosových soustav
- Vývoj dlouhodobých plánů celoevropské sítě
- Koordinace plánů a vývoje, inovačních aktivit a účasti na výzkumných programech

Každoroční nárůst instalovaného výkonu obnovitelných zdrojů má mimo jiné za následek zvýšení přeshraničních toků elektřiny [6]. Členské země tak rozšiřují svoji spolupráci i s dalšími zeměmi, které nejsou součástí ENTSO-E. Jedná se především o sousední země, které mají propojené svoje soustavy. Příkladem může být Turecko, které je synchronně připojeno. Z legislativních důvodů se ovšem turecký provozovatel přenosové soustavy nemohl stát členem, ale stal se pozorovatelem. Který je účastníkem v některých pracovních skupinách pracujících na vzájemně prospěšných projektech. Výměna probíhá s PPS v zemích jako je Maroko, Ukrajina, Moldavsko, Rusko [5].

Český provozovatel přenosové soustavy ČEPS a.s. spolupracuje především se sousedními provozovateli sítí (PPS) v Německu (50Hertz, Tennet DE), Polsku (PSE S.A.), Slovensku (SEPS) a v Rakousku (APG). Dále v rámci regionu pro výpočet kapacit (Core CCR) z angl. Capacity Calculation Region. Jedná se o sdružení pro výpočet kapacit, které tvoří 16 evropských provozovatelů přenosových soustav. Na úrovni těchto výpočtových regionů dochází k vytváření postupů přeshraničního obchodování a provozu přenosových sítí, dále pak vývoji společné metodiky pro výpočet přeshraničních kapacit pro denní a vnitrodenní trh [5].

### 2.1.2 Přenosová soustava ČR

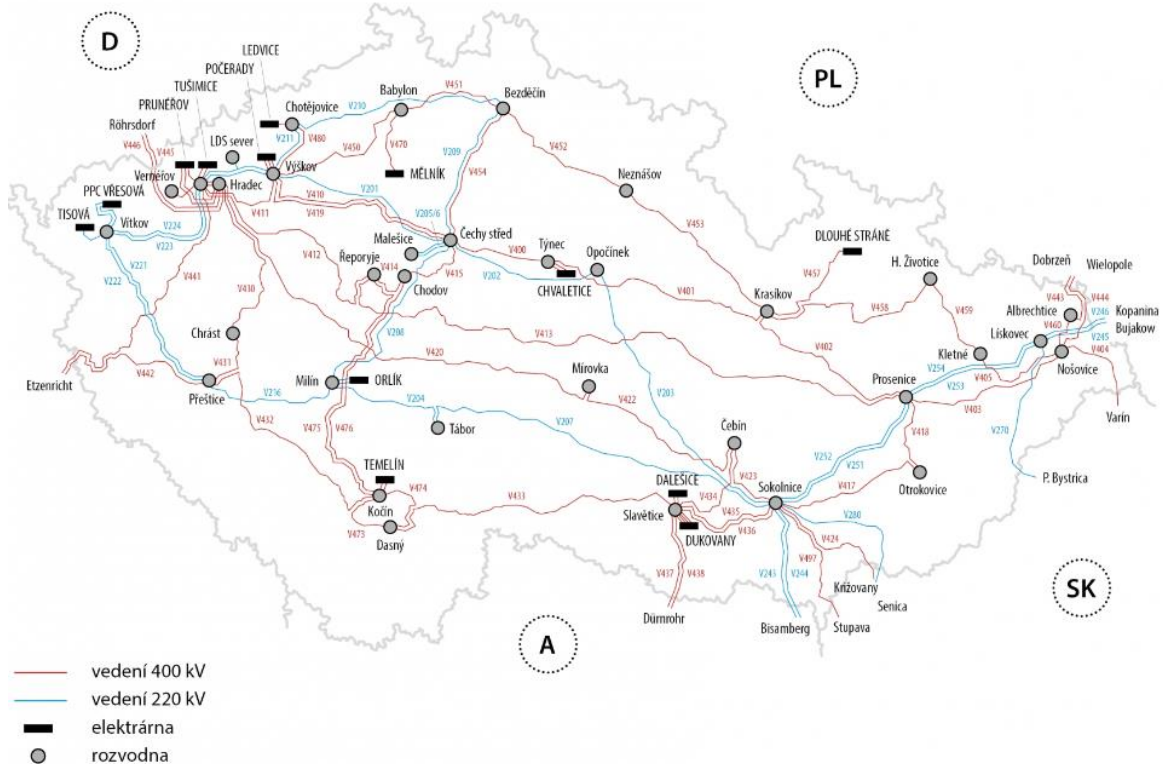
V České republice se jedná o soubor zařízení s napětím 220, 400 kV a vybraných vedení 110 kV, schéma sítí je zobrazeno na *Obr. 2-2*. Českou přenosovou soustavu provozuje výhradně akciová společnost ČEPS na základě licence dle energetického zákona č. 458/2000 Sb.

Zajišťuje systémové služby pro bezpečnou a spolehlivou dodávku pro všechny subjekty na trhu s elektřinou. Pravidla poskytování a užívání služeb jsou zveřejněna v Kodexu přenosové soustavy, který podléhá schválení Energetickému regulačnímu úřadu. V ČR je vydána na provozování přenosové soustavy (PS) jediná licence vzhledem k tomu je přirozeným monopolem. Dlouhodobé úkoly a strategické rozhodnutí vychází z rozhodnutí Ministerstva průmyslu a obchodu a ze státní energetické koncepce [6].

ČEPS a. s. odpovídá za bezpečný a spolehlivý provoz přenosové soustavy na území ČR. Zajišťuje provoz, údržbu, rozvoj a revize jednotlivých prvků. Dále zajišťuje vyrovnanost bilance výroby a spotřeby. Hlavní činnosti, za které je odpovědný [6]:

1. Zajištění systémových služeb pro elektrizační soustavu na úrovni PS.
2. Poskytování přenosu elektřiny na základě uzavřených smluv.
3. Zajištění provozování a rozvoj PS včetně mezi systémových propojení a provádění údržby.
4. Řízení toků elektřiny v PS s respektováním přenosů mezi soustavami ostatních států a ve spolupráci s provozovateli distribučních soustav v elektrizační soustavě.

## Schéma sítí 400 kV a 220 kV



Obr. 2-2 Přenosová soustava ČR [7]

ČEPS a. s. udržuje a obnovuje celkem 43 rozvodů, z toho je 28 rozvodů 400 kV, 14 rozvodů 220 kV a jedna rozvodna 110 kV, s celkovým transformačním výkonem 22 450 MVA. V rozvodně Hradec u Kadaně jsou instalovány 4 Regulační fázové transformátory (PST), které slouží k regulaci toků elektrické energie mezi Německem a Českou republikou. Celkem 70 transformátorů zajišťuje převod elektrické energie mezi přenosovou a distribuční soustavou. Z celkového počtu pak 49 transformátorů zajišťuje převod z napěťové hladiny 400 kV na 110 kV a zbylých 21 zajišťuje převod z napěťové hladiny 220 kV na 110 kV. Celková délka vedení 400 kV je 3 735 km, vedení 220 kV je dlouhé 1 909 km a vedení 110 kV má 84 km. Uvedené údaje jsou platné k 31. 12. 2017 [7].

Přenosová soustava je navržena a provozována tak aby splňovala kritérium „N-1“. To představuje schopnost soustavy udržet dovolené parametry normálního stavu po jednoduchém výpadku. Může dojít ke krátkodobému lokálnímu omezení výroby nebo spotřeby. Nesmí dojít k šíření poruchy, na příklad k přetěžování dalších prvků, k narušení stabilního chodu ani ke kolapsu napětí [6].

Na úrovni PS jednoduchý výpadek znamená, že se jedná o výpadek prvku, kterým může být vedení, transformátor např. 400/100 kV nebo 220/110 kV, přípojnice v rozvodně případně elektrárenský blok [6].

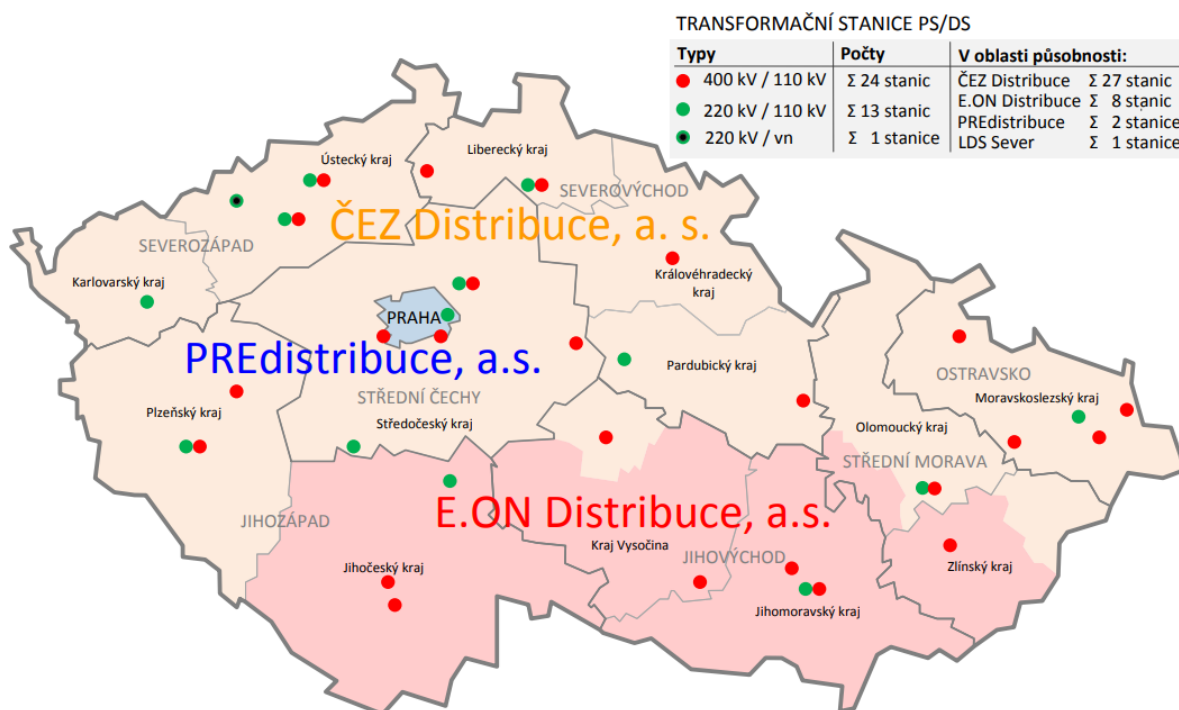
V případě jaderných elektráren musí být splněno kritérium „N-2“. I při výpadku dvou prvků musí být instalovaný výkon bezpečně vyveden [2].

## 2.2 Distribuční soustava

Slouží k rozvodu elektřiny z přenosové soustavy až ke koncovým odběratelům. Zároveň slouží k připojování lokálních výroben elektřiny o určitých výkonech. Součástí distribuční soustavy (DS) jsou měřicí, řídicí, zabezpečovací a informační systémy včetně elektrických přípojek ve vlastnictví provozovatele distribuční soustavy. V České republice (ČR) se jedná o soubor zařízení a vedení o napěťové hladině 110 kV, 0,4/0,23 kV, 1,5 kV, 3 kV, 6 kV, 10 kV, 22 kV, 25 kV nebo 35 kV. Výjimkou jsou vybraná vedení a zařízení 110 kV které jsou součástí PS.

### 2.2.1 Provozovatelé distribuční soustavy

Tzv. distributor je vlastník a provozovatel rozvodné/distribuční sítě. Zajišťuje a spravuje distribuční soustavu na základě licence pro distribuci elektřiny dle energetického zákona. Na území České republiky působí 3 distributoři E.ON Distribuce, a.s., ČEZ Distribuce, a. s. a PREdistribuce, a. s. Každý distributor zajišťuje a spravuje distribuční soustavu na svém distribučním území. E.ON Distribuce, a.s. je držitelem licence na distribuci v oblasti jižních Čech a jižní Moravy, PREdistribuce, a. s. v oblasti hlavního města Prahy a blízkého okolí ČEZ Distribuce, a. s. pak ve zbylých oblastech ČR.



Obr. 2-3 Územní působnost distribučních společností a napájecí body z PS [8]

### 2.2.2 Transformační stanice PS/DS

Zajišťují napájení distribuční soustavy z přenosové soustavy. Oblast jižních Čech a jižní Moravy je napájena ze sedmi nadřazených transformačních stanic tzv. napájecích bodů a jedné stanice nacházející se mimo distribuční území E.ON Distribuce, a.s. [8].

Například nadřazená transformační stanice Čebín zajišťuje napájení třemi transformátory 400/110 kV patrně na Obr. 2-3. Nadřazená stanice Sokolnice napájí distribuční soustavu dvěma transformátory 400/110 kV a jedním transformátorem 220/110 kV [8].

## 2.3 Prvky ovlivňující velikost jalového výkonu

### 2.3.1 Kompenzační tlumivky v sítích VVN a ZVN

Jsou elektrické třífázové prvky, které svou indukčností napomáhají ke kompenzaci přebytečného kapacitního výkonu v sítích a tím i k regulaci napětí. Připojují se v dobách, kdy v sítích převládá přebytek jalového výkonu kapacitního charakteru. To nastává při poklesu přenosu činného výkonu pod přirozený výkon vedení [2].

Místa připojení těchto tlumivek jsou rozvodny a transformovny. Možnostmi připojení k síti jsou přímé připojení k síti, nebo k terciálnímu vinutí transformátorů. Výkon a typ tlumivky je dán velikostí potřebného kompenzačního výkonu. Výkon vyráběných tlumivek je v současné době v řádech stovek Mvar [9].

V napěťových hladinách zvláště vysokého napětí se používají tlumivky v olejovém provedení, které jsou přímo připojeny k síti. Tyto velké kompenzační tlumivky dosahují největšího reaktivního výkonu. V případech připojení k terciálnímu vinutí transformátoru a v napěťových hladinách nižších jak 121 kV se používá vzduchového provedení. Výkon vzduchových tlumivek dosahuje 100 Mvar [9].

### 2.3.2 Venkovní vedení

V případech, kdy je venkovní vedení zatíženo výkonem značně větším, než je přirozený výkon stává se spotřebičem jalového výkonu. To je způsobeno vlivem průchodu proudu ( $I$ ) podélnou impedancí ( $X$ ). Jalové ztráty v příčné impedanci lze u vedení nízkého napětí (NN) a vysokého napětí (VN) zanedbat, v podélné impedanci se pak jalové ztráty rovnají přibližně [10], [11]:

$$\Delta Q = 3 \cdot X \cdot I^2 \quad (2.1)$$

U dlouhých vedení VVN a ZVN jsou nejpodstatnějšími parametry indukčnost a kapacita. V dobách snížení zatížení pod hodnotu přirozeného výkonu až k chodu naprázdno převládá nabíjecí kapacitní výkon. Vedení se tak stává zdrojem jalového výkonu a může dojít k tzv. Ferrantiho jevu, jedná se o stav, kdy na konci vedení je napětí vyšší než na začátku [11].

### 2.3.3 Kabelové vedení

Používají se v oblastech, kde z nejrůznějších důvodů nelze použít venkovní vedení. Provozní i pořizovací náklady jsou podstatně vyšší v porovnání s nadzemním vedením. Především se s nimi setkáváme v průmyslových oblastech a ve městech [12].

Jejich provozní kapacita je několikrát větší než u venkovního vedení, současně mají malou indukčnost. Kabelové vedení je tedy zdrojem jalového výkonu. Na hladině 110 kV je nabíjecí výkon  $Q_{ck} = 100$  Mvar/100 km na hladině 22 kV pak  $Q_{ck} = 5$  Mvar/100 km.

### 2.3.4 Synchronní kompenzátory

Jedná se o elektrické točivé stroje využívané k regulaci napětí a jalového výkonu. Principiálně se jedná o synchronní motor s nevyvedenou hřídelí [2].

Pracují jako přebuzené synchronní motory. Dle nastaveného buzení odebírají ze sítě jalový výkon kapacitního charakteru tzn. jako by dodávali jalový výkon indukčního charakteru. V případě nastavení podbuzeného stavu pracují jako spotřebič jalového výkonu indukčního charakteru.

V přenosové soustavě na území ČR se provozují dva kompenzátory ve stanici Krasíkov. Připojeny jsou k terciálnímu vnutí transformátoru 440/110 kV [2].

### 2.3.5 Synchronní generátory

Primárním úkolem je dodávání činného výkonu do sítě. Ovšem mohou být využity pro dodávku nebo odběr jalového výkonu.

Synchronní generátor má na statoru třífázové vinutí a na rotoru stejnosměrný elektromagnet (buzení). Ovlivnit dodávku nebo odběru jalového výkonu lze pomocí jeho buzení [1].

Generátor je poháněn hnacím zařízením a je mu dodáván konstantní příkon. Na základě dodávaného příkonu dodává do sítě činný výkon. Vlivem zvětšení budícího proudu tzv. přebuzení generátoru začne do sítě dodávat jalový výkon. Snížením budícího proudu dochází k odběru jalového výkonu [1].

### 2.3.6 Transformátory

Jsou elektrické netočivé stroje, které se využívají k transformaci napětí na různé napěťové hladiny (VVN/VN, VN/NN), případně k řízení napětí a regulaci výkonových toků, záleží na použitém druhu [11].

Ve vztahu k jalovému výkonu se jedná o spotřebiče. Pracují na principu elektromagnetické indukce a jalový výkon je využíván k sycení magnetického obvodu. Jalový příkon je pak dán přibližným vztahem [11]:

$$\Delta Q_P = \Delta Q_0 + \Delta Q_K \left( \frac{S}{S_N} \right)^2 \quad (2.2)$$

Kde jalové ztráty naprázdno jsou:

$$\Delta Q_0 = i_0 \cdot S_n \quad (2.3)$$

Pomocí napětí nakrátko lze určit jalový příkon nakrátko jako:

$$\Delta Q_K = u_K \cdot S_n \quad (2.4)$$

Za předpokladu, že máme transformátor o výkonu  $S_N = 100$  MVA zatížený jmenovitým zatížením  $S = S_N$ , při proudu naprázdno  $i_0 = 0,01 I_N$  a  $u_K = 0,1$ . Po dosazení do uvedených rovnic dostáváme  $\Delta Q_P = 0,01 \cdot S_n + 0,1 \cdot S_n = 0,11 \cdot S_n = 11$  Mvar. Což odpovídá 11 % jmenovitého výkonu [11].

### 2.3.7 Asynchronní motor

Jedná se o nejrozšířenější elektromotory. Ze všech elektrických strojů se jedná o nejjednodušší stroje tzn. i nejlevnější. Na statoru je navinuto třífázové vinutí. Rotor má klec z hliníku, nebo třífázové vyvedené vinutí pro regulaci měkkého rozběhu. Rotor se otáčí rychleji než jeho elektromagnetické pole [1].

Asynchronní motory i generátory nejsou schopné regulace  $Q$ . Pro vytvoření magnetického pole odebírá ze sítě  $Q$  [1].

### 2.3.8 Zhášecí tlumivka

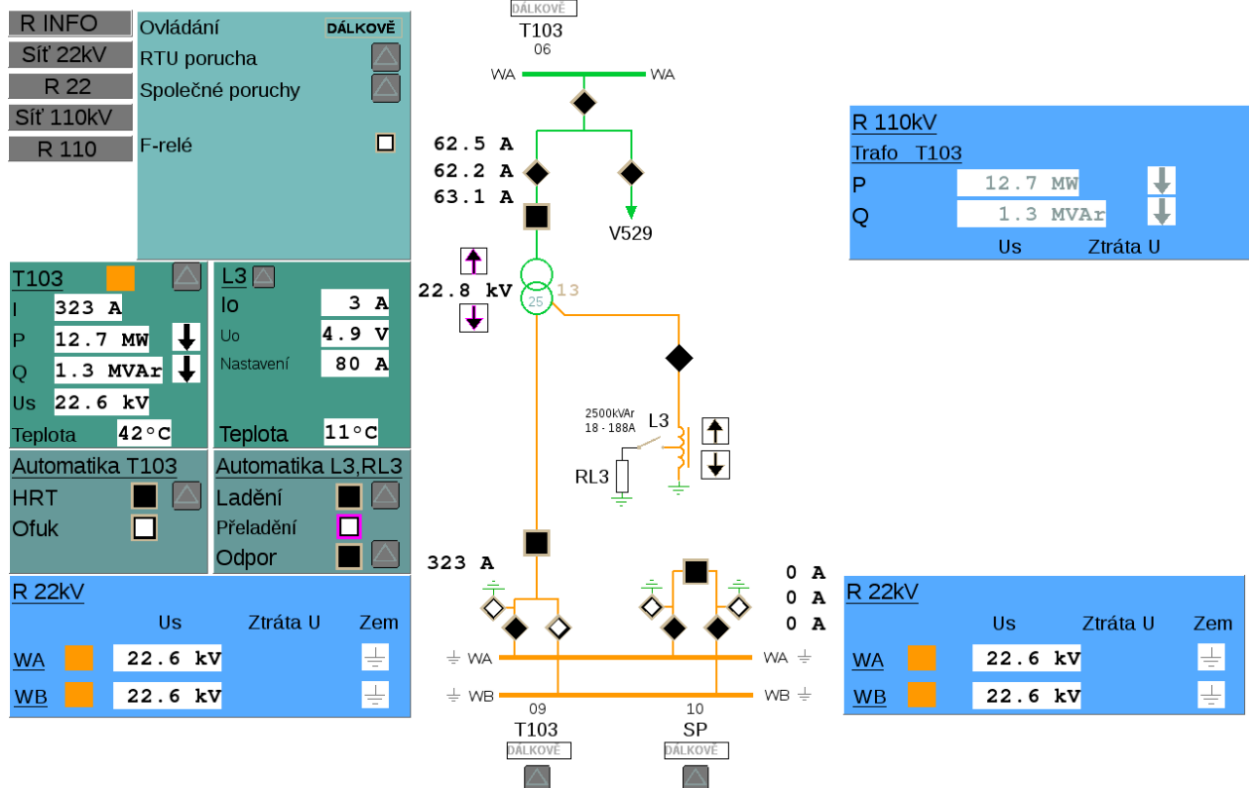
Také označována jako zhášecí kompenzační tlumivka nebo Petersenova cívka se používá v sítích VN, které se v České republice provozují jako kompenzované. Kompenzační tlumivka se

zapojuje mezi nulový bod napájecího transformátoru a zem. Tímto zapojením se kompenzuje kapacitní proud zemního spojení, tak že místem poruchy prochází jen zbytkový proud [12].

V provozu je nejčastěji využíváno centralizované kompenzace, použití jedné kompenzační tlumivky, která je zapojena do uzlu transformátoru a zemnicí soustavu rozvodny. Schéma takto zapojené tlumivky je na Obr. 2-4. Tlumivka je nastavována automatickou tak aby místem poruchy procházel pouze malý zbytkový proud [12].

Při zemním spojení je možné takto kompenzovanou síť provozovat než dojde k odstranění jeho příčiny, ovšem hrozí riziko rozšíření na závažnější poruchu. Z důvodu bezpečnosti tak v sítích E.ON nejsou vedení provozována při zemním spojení.

### KB - TR 110/22 kV



Obr. 2-4. Schématické zapojení zhášecí tlumivky v rozvodně Klobouky (KB) [13]

## 3 TEORIE ELEKTRICKÝCH VÝKONŮ

### 3.1 Koncepce volby kladných směrů

Pro správné sestavení analýzy je vhodné zvolit vhodnou znaménkovou koncepci pro volbu kladných směrů veličin napětí, proudů a výkonů. Konzistentní interpretace usnadňuje řešení a orientaci ve vyhodnocení informací [14].

Existují tři hlavní systémy:

- Spotřebičový – výkon spotřebiče je kladný
- Zdrojový – výkon zdroje je kladný
- Smíšený – výkon zdroje i spotřebiče má stejnou polaritu

Zvolená koncepce má za následek různé formulace bilančních zákonů. V systému smíšeném zní první Kirchoffův zákon: Co do uzlu přitéká, to také z uzlu vytéká. Ve zdrojovém a spotřebičovém systému ovšem tento zákon říká, že součet proudů v uzlu je nulový [14].

V této práci je zvolena znaménková koncepce spotřebičového systému. Výkon, který směřuje ze systémových elektráren přenosovou soustavou do distribuční soustavy VVN dále pak do soustavy VN s následným rozvodem do NN, je volen kladný. V případech, kdy se výkon vrací do nadřazené soustavy (např. směřuje z VN do VVN) má znaménko záporné.

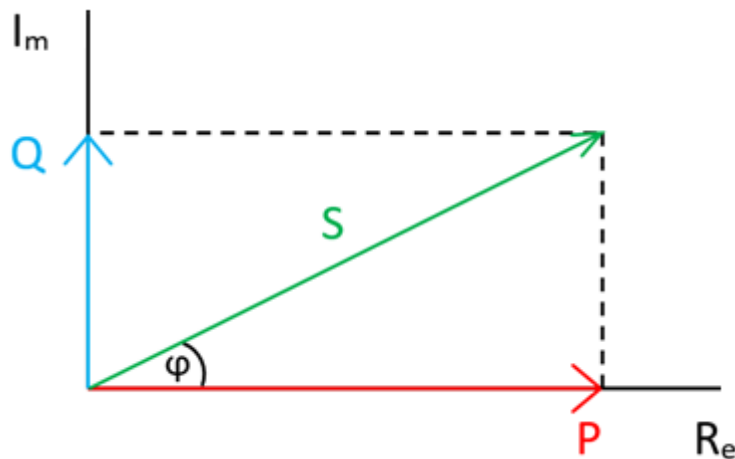
### 3.2 Zdánlivý výkon

Každý alternátor je navrhován na určité jmenovité napětí  $U$  a jeho vodiče dimenzovány na trvalý jmenovitý proud  $I$ . Alternátory dodávají jmenovitý výkon, který je v souměrné třífázové soustavě popsán rovnicí [10]:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (3.1)$$

Tento výkon nazýváme zdánlivým výkonem, který je dán součinem proudu a napětí. Lze jej rozložit na činnou složkou označovanou  $P$  a jalovou složkou označovanou  $Q$ . Znázorněno na Obr. 3-1. Geometrický součet činného a jalového výkonu [10]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.2)$$



Obr. 3-1 Vektorový diagram činného, jalového a zdánlivého výkonu



### 3.3 Činný výkon

Za předpokladu souměrně zatížených fází je dán rovnicí:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (3.3)$$

Jedná se o složku zdánlivého výkonu, která vykonává práci. Ve spotřebiči dochází k přeměně elektrické energie na jiný druh. Například v případech motorů dochází k přeměně na mechanickou energii, v dalších spotřebičích jako jsou odporová topidla dochází k přeměně na energii tepelnou [10].

### 3.4 Jalový výkon

Za předpokladu souměrně zatížených fází je dán rovnicí:

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (3.4)$$

Je druhá složka zdánlivého výkonu, nekoná užitečnou práci. Ke své funkci ho potřebují spotřebiče, které ho využívají k tvorbě magnetického a elektrického pole. Tento výkon je poté spotřebičem vrácen zpět do sítě kudy se vrací do zdroje [10].

### 3.5 Účinník

V sítích se předpokládá odběr s účinníkem v rozsahu 0,95 (ind.) – 1. Vlivem například všech indukčních zařízení, jako jsou asynchronní motory, transformátory. Tedy vlivem magnetizačních složek proudů, které způsobují odklon vektoru proudu od vektoru napětí o úhel  $\varphi$  [10]. Může docházet k odběru s účinníkem s hodnotou mimo předpokládaný rozsah.

Účinník je daný poměrem činné složky proudu ke skutečnému proudu. Ve vztahu k výkonům platí obdobný poměr, činná složka výkonu ke zdánlivému výkonu.

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (3.5)$$

V příloze A jsou uvedeny mezní hodnoty úhlu  $\varphi$ . V praxi se ovšem běžně nevyskytuje žádný z těchto případů takto ideálně, ale vznikají různé kombinace [10].

Indukčnost (cívka) způsobuje v obvodu zpoždění vektoru proudu za vektorem napětí. Lze říci, že ze sítě odebírají  $Q$ . V ideálním případě  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\cos(\varphi) = 0$ , odběr  $Q$  [1]. Znázorněno v příloze A na Obr. A-1.

Kapacity (kondenzátory) připojené do obvodu způsobují předstih vektoru proud před vektorem napětí. Dodávají  $Q$  do sítě. V ideálním případě  $\varphi = -90^\circ$ ,  $\cos(\varphi) = 0$ , dodávka  $Q$  [1]. Znázorněno v příloze A na Obr. A-2.

Odpory (žárovky, odporová topidla) nemají magnetizační proudy, nezpůsobují tedy odklon vektoru proudu od napětí. Pracují s účinníkem 1,  $Q = 0$  var [1]. Znázorněno v příloze A na Obr. A-3.

#### 3.5.1 Vliv účinníku v energetice

Odběr s účinníkem s hodnotou mimo rozsah 0,95 (ind.) – 1 (menším než 0,95 (ind.)) má na elektrizační soustavu tyto vlivy [10]:

1. Při přenosu stálého činného výkonu se špatným účinníkem narůstá velikost jalového výkonu a tím i velikost přenášeného proudu. To způsobuje nárůst ztrát.

2. Velký přenášený proud má za následek, že vedení musí být patřičně dimenzováno (větší průřez vodičů). Což způsobuje zvětšené náklady.
3. Velikost proudu má vliv i na dimenzování dalších prvků jako jsou například měřicí přístroje, jištění, spínací zařízení.
4. Velká jalová složka proudu má vliv na celkový úbytek napětí vzniklý přenosem. Úbytek napětí vzniklý činnou složkou proudu nelze odstranit, lze ovšem zlepšením účinku (snížením jalové složky proudu) snížit úbytek napětí na indukční reaktanci způsobený jalovým proudem.

### 3.6 Ferrantiho jev

U dlouhých vedení VVN a ZVN se silně projevuje kapacita ( $C$ ), která vyvolává nabíjecí proudy a výkony. V případech, kdy jsou tato vedení málo zatížena příp. nezatížena nastává stav kdy napětí na konci vedení je větší než na začátku tzv. Ferrantiho jev.

Vztah pro výpočet nabíjecího proudu trojfázového vedení:

$$I_{nab} = I_c = 2 \cdot \pi \cdot C \cdot U \cdot 10^{-6} \quad (3.6)$$

Vztah pro výpočet nabíjecího výkonu trojfázového vedení:

$$Q_{CK} = 3 \cdot U_f \cdot I_{nab} \quad (3.7)$$

Odvození Ferrantiho jevu je provedeno v příloze B.

### 3.7 Přirozený výkon vedení

Vycházíme-li z podmínky, že máme vedení naprázdno a postupně dochází ke zvětšování odběru. Nastává stav, kdy je vedením přenášen tzv. přirozený výkon, při kterém se energie magnetického pole rovná energii elektrického pole. Jedná se o nejpříznivější stav.

Vztah pro výpočet magnetické energie:

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (3.8)$$

Kde:  $L$  je indukčnost

$I$  je procházející proud

Vztah pro výpočet elektrostatické energie:

$$W_e = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (3.9)$$

Vztah pro výpočet přirozeného výkonu:

$$P_P = 3 \cdot \frac{U_f^2}{Z_V} = \frac{U_S^2}{Z_V} \quad (3.10)$$

Kde:  $U_f$  je fázové napětí

$U_s$  je sdružené napětí

$Z_V$  je vlnová impedance

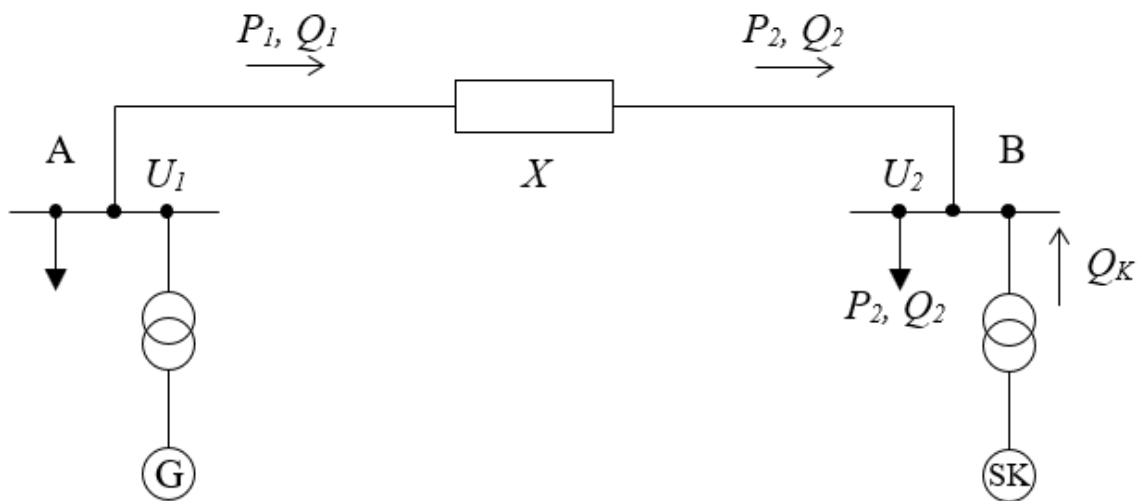
Vztah pro výpočet vlnové impedance:

$$Z_v = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.11)$$

U ideálního vedení (zanedbaný činný odpor) by byla napětí na konci a na začátku vedení stejná. Pokud je přenášený výkon menší, než  $P_P$  je napětí na začátku větší než na konci. Jestliže je přenášený výkon větší, než  $P_P$  je napětí na konci vedení menší než na začátku.

### 3.8 Regulace napětí jalovým výkonem

Je uvažován jednoduchý přenos dle schématu na Obr. 3-2. Ve zjednodušeném schématu se předpokládá vedení se zanedbatelným ohmickým odporem  $X \gg R$  a zanedbanou příčnou větví [11].



Obr. 3-2 Zjednodušené schéma [10]

V Obr. 3-2 je znázorněno, že z uzlu A je přenášen činný a jalový výkon do uzlu B. V uzlu B je odběr činného i jalového výkonu. Současně je k uzlu připojen synchronní kompenzátor (SK), který dle potřeby může odebírat nebo dodávat jalový výkon [11].

Obecný fázorový diagram pro uvažovaný jednoduchý přenos je zobrazen na Obr. 3-3. Činný i jalový výkon je přenášen z uzlu A do uzlu B. Uzel B je spotřebičem činného i jalového výkonu, který má induktivní charakter. Tomuhle přenosu odpovídá, že  $U_1 > U_2$  [11].

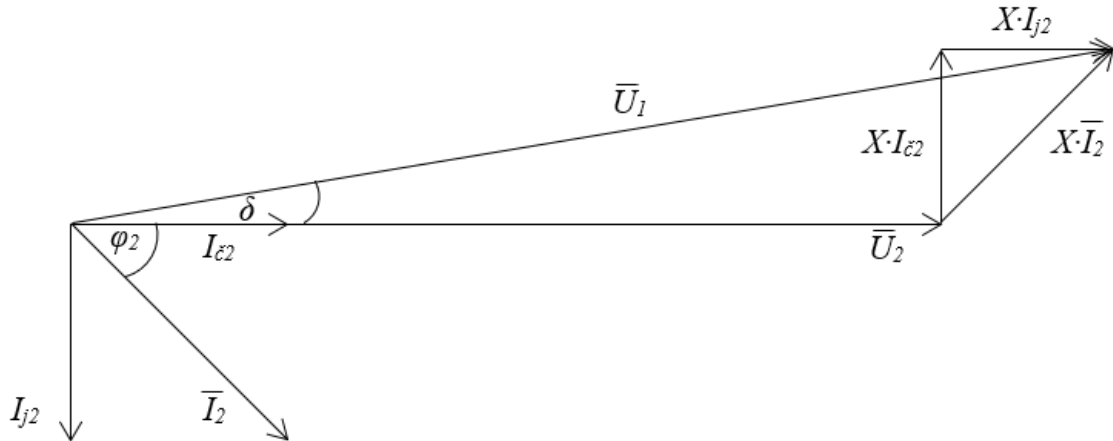
Úbytek napětí  $\Delta U$  lze vyjádřit vztahem:

$$\Delta U = U_1 - U_2 = X \cdot I_{j2} = X \cdot \frac{Q_2}{U_2} = R_e(X \cdot \bar{I}_2) \quad (3.12)$$

- Kde:
- $U_1$  je napětí v uzlu A
  - $U_2$  je napětí v uzlu B
  - $X$  je reaktance vedení
  - $Q_2$  je odebíraný jalový výkon

Přípustný odběr jalového výkonu  $Q_2$  lze nyní vyjádřit:

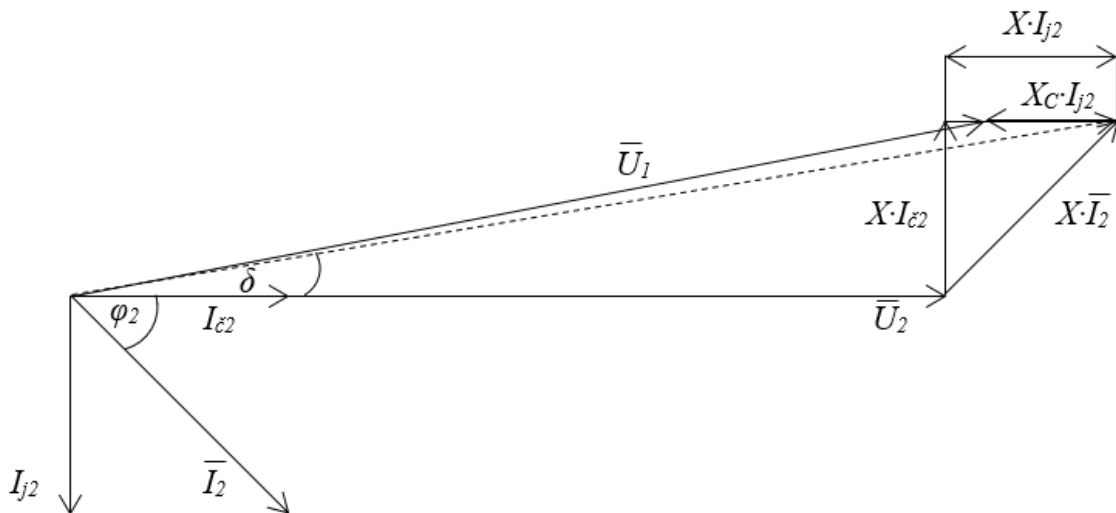
$$Q_2 = \frac{U_2 - (U_1 - U_2)}{X} \quad (3.13)$$



Obr. 3-3 Fázorový diagram pro zjednodušený přenos [11]

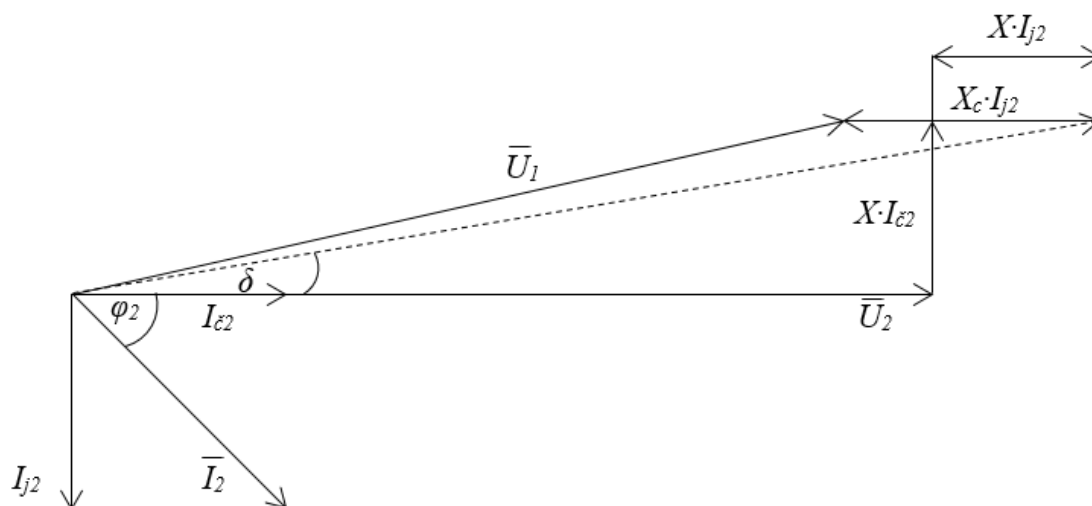
Výrobou jalového výkonu v uzlu B pomocí synchronního kompenzátoru, lze snížit velikost přenášeného jalového výkonu tzv. vyhnout se dopravě z uzlu A do uzlu B a tím snížit i úbytek napětí na vedení [11].

Na Obr. 3-4 je vyznačen fázorový diagram zjednodušeného přenosu, v případě, kdy synchronní kompenzátor dodává do uzlu B obecně zadanou velikost jalového výkonu, aby bylo dosaženo požadovaného úbytku napětí [11].



Obr. 3-4 Fázorový diagram pro zjednodušený přenos s kompenzací [11]

V případě, kdy je dodávaný kompenzační výkon větší jak spotřebovávaný jalový výkon, dochází k obrácení změně toku jalového výkonu z uzlu B do uzlu A. To způsobuje, že napětí  $U_2$  je větší než napětí  $U_1$  v uzlu A. Znázorněno na Obr. 3-5. Tímto se potvrzuje zřejmý vliv směru toku jalového výkonu na napětí [11].



Obr. 3-5 Fázorový diagram pro zjednodušený překompenzovaný přenos [11]

## 4 DECENTRALIZOVANÉ ZDROJE ENERGIE

Produkují elektřinu (případně i teplo) v blízkosti místa spotřeby. Jedná se o velký počet rozptýlených zdrojů nižších výkonů v závislosti na lokálně dostupných zdrojů. Výpadek jednoho zdroje významně neovlivní elektrizační soustavu. Mezi decentralizované zdroje energie (DECE) se zahrnují kogenerační zdroje energie (sdružená výroba elektřiny a tepla) a v současné době především obnovitelné zdroje energie (OZE), které si kladou za cíl především omezit poškozování životního prostředí spalováním fosilních paliv. U většiny OZE nedochází ke spalování (výjimkou je spalování biomasy, bioplynu a biopaliv).

### 4.1.1 Obnovitelné zdroje energie v České republice

Obnovitelné zdroje jsou v přírodě volně k dispozici. Z pohledu lidských potřeb jsou nevyčerpatelné a samy nebo s přispěním člověka se obnovují v časových měřítcích srovnatelných s jejich využíváním.

V ČR jsou nejvíce zastoupeny zdroje využívající energii vody, větru, slunečního záření, biomasy, bioplynu a geotermální [15].

#### 4.1.1.1 Fotovoltaické elektrárny

Využití energie slunečního záření patří k nejčistším a nejšetrnějším způsobům výroby elektřiny z pohledu ochrany životního prostředí. Jedná se o energii, které je a bude v přírodě dostatek. V ČR je průměrná intenzita slunečního záření odhadována na  $300 \text{ W/m}^2$  [15].

K řízení dodávky/odběru jalového výkonu se používá střídač. Jedná se o polovodičový měnič stejnosměrného napětí na střídavé napětí sítě. Řízením úhlu mezi střídavým napětím a proudem dochází k dodávce nebo odběru  $Q$ . Dodávkou  $Q$  do sítě se zvyšuje napětí v místě připojení, při odběru  $Q$  napětí v místě připojení klesá. Z tohoto důvodu jsou fotovoltaické elektrárny (FVE) vhodné k regulaci napětí v síti [1].

#### 4.1.1.2 Bioplynové elektrárny (BPE)

Jsou regulovatelné a stabilní zdroje, které lze využít k regulaci  $Q$ . Při rozkladu biomasy se nepřetržitě uvolňuje bioplyn. Hlavní složkou bioplynu je metan a oxid uhličitý. Bioplyn lze použít jako palivo spalovacího motoru k přeměně na mechanickou energii, která se pomocí generátoru přemění na elektřinu a v kogeneraci i na teplo [16].

#### 4.1.1.3 Vodní elektrárny (VE)

V České republice nejsou vhodné podmínky pro budování velkých vodních elektráren. I přesto v plní důležitou roli především jako doplňkový zdroj energie a jako vhodný zdroj operativního vyrovnání okamžité energetické bilance [15].

Do instalovaného výkonu 10 MW jsou označovány jako malé vodní elektrárny u kterých se používá synchronní generátor. U těchto elektráren lze řídit odběr/dodávku jalového výkonu ze sítě.

#### 4.1.1.4 Větrné elektrárny (VTE)

Na území České republiky jsou vhodné lokality pro výstavbu větrných elektráren především plochy v nadmořských výškách nad 600 m. Ovšem elektřinu z větru je možné efektivně vyrábět i v níže položených oblastech. Podle studií mají největší potenciál větrné energie oblasti severních Čech, severní Moravy a jižní Moravy. Nejméně vhodná je oblast jižních Čech [15].

Větrné elektrárny mohou využívat k výrobě elektřiny například asynchronní stroje s převodovkou, s rotorem napájeným přes střídač. U těchto elektráren lze regulovat  $Q$  jako u synchronních strojů. Využit lze i vícepólové synchronní stroje bez převodovky. U tech je pak silová energie větru vedená přes usměrňovač a pak přes střídač 50 Hz, kterým lze řídit úhel mezi napětím a proudem tedy regulovat  $Q$  [1].

#### 4.1.2 Kogenerační zdroje energie

Současně vyrábějí elektřinu i teplo. Oproti konvenčním zdrojům jsou efektivnější a ekologicky šetrnější, neboť konvenční zdroje při výrobě elektřiny přebytečné teplo vypouští do ovzduší. U kogenerace je teplo dále využito a tím se podstatně zvyšuje účinnost energetického procesu. Kogenerační jednotky jsou dostupné v širokém výkonovém rozsahu od jednotek kWe až po stovky MWe. Jako vstupní palivo lze využít mnoho druhů například uhlí, zemní plyn, biomasu a bioplyn [17].

V decentralizované výrobě jsou využívány především jednotky s plynovými motory. Jako palivo se používá zemní plyn nebo bioplyn. U těchto jednotek je celková účinnost využití paliva nad 90 % [17]. U kogeneračních elektráren (KGE) lze regulovat  $Q$ .

#### 4.1.3 Přehled instalovaných zdrojů do sítě 22 kV ve zvolených oblastech

V následujících tabulkách *Tab. 4-1* a *Tab. 4-2* jsou uvedeny všechny DECE instalované v oblasti 1 (Brno) a oblasti 2 (regiony jižně od Brna) k 31. 12. 2017. Jsou rozděleny na zdroje, u kterých lze dálkově regulovat činný výkon  $P$  i jalový výkon  $Q$ , u kterých lze regulovat pouze činný výkon  $P$  a zdroje, které neumožňují dálkovou regulaci z dispečerského řídicího systému.

Do kategorie ostatní jsou zařazeny výrobní v oblasti 1 například spalovna odpadu Brno s instalovaným výkonem 22 700 kW, v oblasti 2 jsou to pak výrobní například cukrovar Hrušovany nad Jevišovkou s instalovaným výkonem 12 000 kW.

*Tab. 4-1 Celkový přehled decentralizovaných zdrojů v oblasti 1, k 31. 12. 2017 [13]*

Typ zdroje	Regulace $P, Q$		Regulace $P$		Bez regulace		Celkem	
	Počet	$P_i$ (kW)	Počet	$P_i$ (kW)	Počet	$P_i$ (kW)	Počet	$P_i$ (kW)
FVE	15	28248	16	7319	7	3331	38	38898
BPE	6	5159	3	1508	2	500	11	7167
KGE	3	3566	2	1006	6	4580	11	9152
VE	0	0	0	0	3	3462	3	3462
VTE	0	0	0	0	0	0	0	0
Ostatní	0	0	0	0	2	24300	2	24300
Všechny	24	36973	21	9833	20	36173	65	82979

*Tab. 4-2 Celkový přehled decentralizovaných zdrojů v oblasti 2, k 31. 12. 2017 [13]*

Typ zdroje	Regulace $P, Q$		Regulace $P$		Bez regulace		Celkem	
	Počet	$P_i$ (kW)	Počet	$P_i$ (kW)	Počet	$P_i$ (kW)	Počet	$P_i$ (kW)
FVE	66	153794	21	14943	12	3560	99	172297
BPE	7	8499	4	1926	2	3116	13	13541
KGE	1	4000	1	520	1	640	3	5160
VE	0	0	0	0	4	3939	4	3939
VTE	2	6250	0	0	0	0	2	6250
Ostatní	0	0	0	0	3	16016	3	16016
Všechny	76	172543	26	17389	22	27271	124	217203

#### 4.1.4 Rozvoj FVE na distribučním území E.ON

V České republice začal okolo roku 2010 tzv. fotovoltaický boom, do roku 2010 byly na distribučním území E.ON evidovány pouze desítky fotovoltaických elektráren s celkovým instalovaným výkonem do 200 MW. V oblasti Západ (oblast Jihočeského kraje) bylo instalováno 23 % z celkového počtu, 77 % pak bylo instalováno v oblasti Východ.

Ke konci roku 2010 se celkový počet elektráren téměř zdvojnásobil, taktéž se zdvojnásobil i celkový instalovaný výkon. Rokem 2011 pokračoval nastolený trend výstavby. Na konci roku 2011 byl opět celkový počet téměř dvojnásobný než na začátku roku. Rozvoj a výstavba probíhala především v oblasti Východ.

V roce 2012 bylo na celém distribuční území nainstalováno pouze několik jednotek elektráren a celkový počet a instalovaný výkon se oproti předchozím rokům výrazně neměnil. V roce 2013 bylo nainstalováno pouze několik desítek elektráren, celkový instalovaný výkon se od roku 2012 výrazně nezměnil.

V roce 2014 nastal poslední větší rozvoj instalování elektráren. Do konce roku 2014 se celkový počet zvýšil o více jak 22 %. Od konce roku 2014 nastalo velmi výrazné omezení nárůstu. V roce 2015 a 2016 bylo připojeno k distribuční síti pouze několik elektráren. Od roku 2016 až do konce roku 2018 se počet a jejich instalovaný výkon neměnil.

Od roku 2010 až do roku 2018 je celkový počet fotovoltaických elektráren více než pětinašobný, celkový instalovaný výkon je téměř pětinašobný. V oblasti Východ je instalováno 75 % a zbylých 25 % elektráren pak v oblasti Západ, stejný poměr rozdělení pak platí i pro instalovaný výkon.

#### 4.1.5 Řízení a regulace z dispečerského řídicího systému

Z Tab. 2-1 je zřejmé, že regulaci činného výkonu z DŘS v oblasti 1 umožňuje 45 zdrojů s celkovým instalovaným výkonem 46 806 kW. V oblasti 2 dle Tab. 2-2 umožňuje regulaci 102 zdrojů s instalovaným výkonem 189 932 kW. Regulaci jalového výkonu umožňuje v oblasti 1 celkem 24 zdrojů s celkovým instalovaným výkonem 36 793 kW, v oblasti 2 umožňuje regulaci 76 zdrojů s instalovaným výkonem 172 543 kW.

Pro případ omezení činného výkonu jsou neřiditelné OZE rozděleny do skupin, u těchto skupin lze hromadně regulovat dodávku činného výkonu. V rozsahu 0 % – 30 % - 60 % - 100 % rezervovaného příkonu zdroje. Požadovanou změnu jalového výkonu lze provádět pouze individuálně pro každý zdroj. Regulace se provádí nastavením účinníku  $\cos(\varphi)$  v rozsahu 0,95 (ind.) – 1 – 0,95 (kap.).

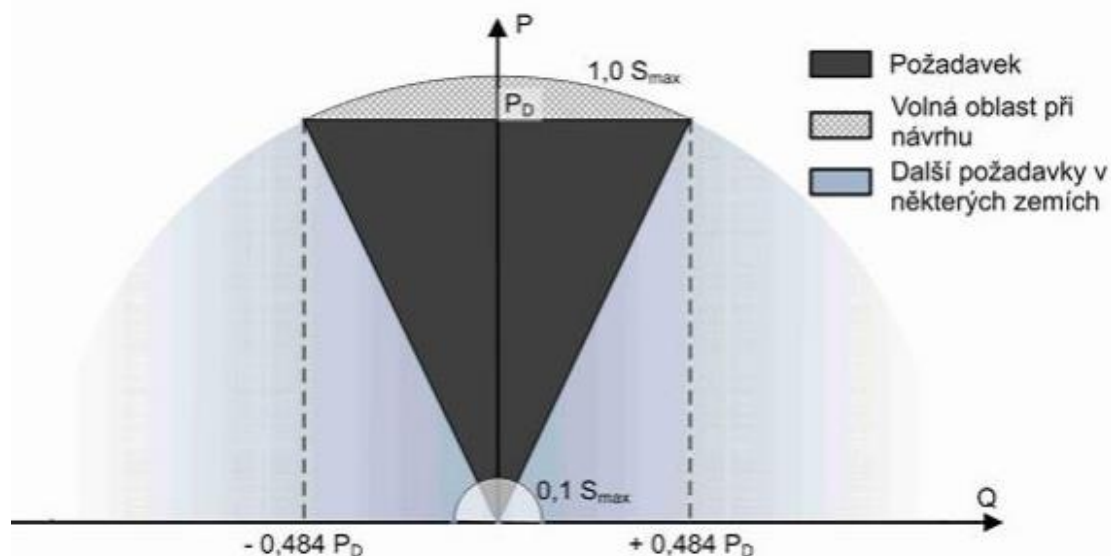
Pro všechny typy zdrojů je způsob regulace  $P$ , nebo  $Q$  v DŘS shodný. Na Obr. 4-1 je znázorněna aktuálně nastavená regulace pro FVE.

R INFO		FVETuranyBS1T09		
Sít 22kV	Sběrny 0.4kV	Sběrny 22kV	Generátory	Regulace
RTU porucha	WG	WA	G1	Hromadna regulace P blokována <input type="checkbox"/>
Společná por.	Us	Us 22.93	Sn 4.60	Regulace P 100 %
			P 0.57	Automaticka regulace Q blokována <input checked="" type="checkbox"/>
			Q 0.37	KAP vice U IND mene U
				Regulace Q cos fi 1

Obr. 4-1 Regulace FVE Tuřany [13]



Na Obr. 4-2 je grafické znázornění minimálních i nepovinných požadavků dodávky/odběru jalového výkonu při jmenovitém napětí.  $P_D$  je navrhovaný výkon výroby,  $S_{max}$  je maximální zdánlivý výkon výroby [1].



Obr. 4-2 Využití PQ diagramu pro regulaci  $U/Q$  [1]

Provozovatel distribuční soustavy má dle platné přílohy č. 4 Pravidel pro provozování distribučních soustav (PPDS) nárok požadovat regulaci jalového výkonu zdroje v oblasti účinníku  $\pm 0,9$ . V této oblasti se pohybuje i pracovní bod zdroje při regulaci napětí [1]. Jalový výkon se na DÚ E.ON u výroben nereguluje ( $\cos(\varphi)$  se vrací na 1), v případě, když aktuálně dodávaný výkon výroby klesne pod 20 % instalovaného výkonu.

#### 4.1.6 Automatická regulace účinníku a napětí decentralizovaných zdrojů

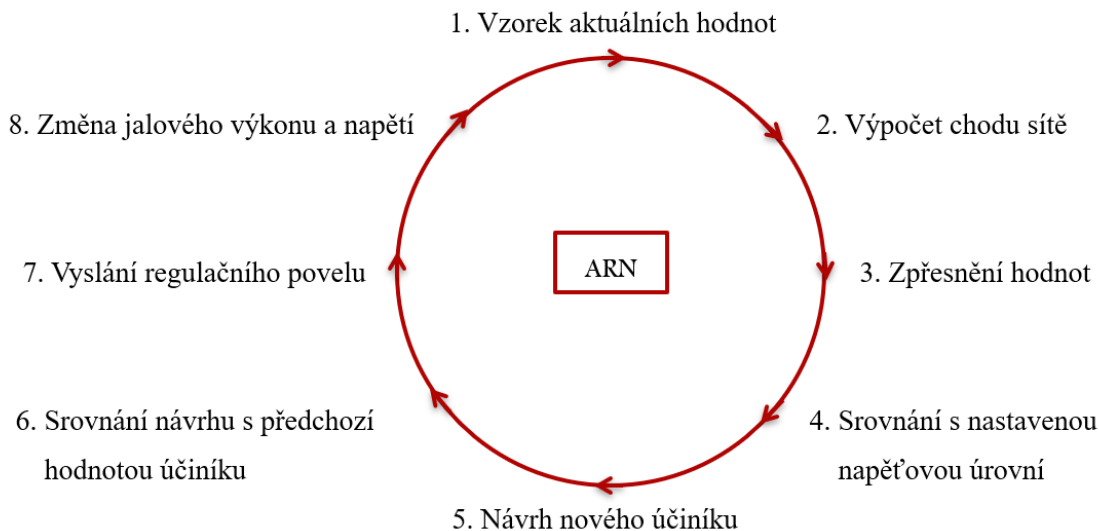
Připojené decentralizované zdroje mohou způsobovat značné kolísání napětí v síti. Změny napětí lze regulovat i pomocí transformátorů 110/22 kV, změnou odbočky transformátorového vinutí. Změny odboček jsou prováděny při zatížení v situacích, kdy dojde k odchylce od napěťové hladiny 22,8 kV. Na základě příkazu z hladinové regulace transformátoru (HRT). Touto regulací je ovlivňováno napětí v celé napájecí oblasti transformátoru. Připojením DECE ke konci vedení 22 kV vzniká kolísání napětí podél vedení, které HRT nedokáže regulovat. Napětí v místě připojení DECE lze řídit tzv. regulací  $U/Q$ . V místě připojení zdroje je požadováno konstantní napětí, kterého se dosahuje změnou odběru/dodávky jalového výkonu. Na Obr. 4-4 jsou zjednodušeně uvedeny tři základní případy, které mohou nastat na vedení VN.

V případě, kdy k vedení není připojený žádný decentralizovaný zdroj, napětí klesá se vzdáleností od rozvodny. Jednotlivé distribuční transformátory 22/0,4 kV mají pevně nastavené odbočky tak, aby na hladině 0,4 kV bylo napětí dle normy [1].

V případě, kdy je k vedení připojený zdroj, mění se velikost napětí podél vedení. Odbočky na transformátorech 22/04 kV jsou pevně nastavené a změnou napětí na primární straně by došlo ke změně i na straně sekundární. Pokud by bylo k vedení připojeno několik nebo velký zdroj, napětí v místě připojení by bylo vyšší než na přípojnicí [1].

Automatická regulace účinníku efektivně reguluje dodávku/odběr jalového výkonu beze změny činného výkonu každého zdroje, tak aby byla v místě připojení požadovaná velikost napětí. Princip funkce je znázorněn na Obr. 4-3. V prvním kroku je použit aktuální vzorek hodnot. Následně je

proveden výpočet chodu sítě z měřených hodnot  $P$  a  $Q$  na vývodech z rozvodny. Výsledky z druhého kroku jsou dále zpřesněny, zařazením měřených hodnot napětí. Ve čtvrtém kroku je provedeno srovnání s nastavenou napěťovou úrovní a mezí. V dalších krocích je navrhnout nový účinník, provedeno jeho srovnání s předchozí hodnotou. Na základě srovnání je vyslán regulační povel pro výrobu, podle kterého je provedeno nastavení požadovaného účinníku. Mezi 8. a 1. krokem je dvou minutový časový interval.



Obr. 4-3 Zjednodušený princip funkce automatické regulace účinníku [13]

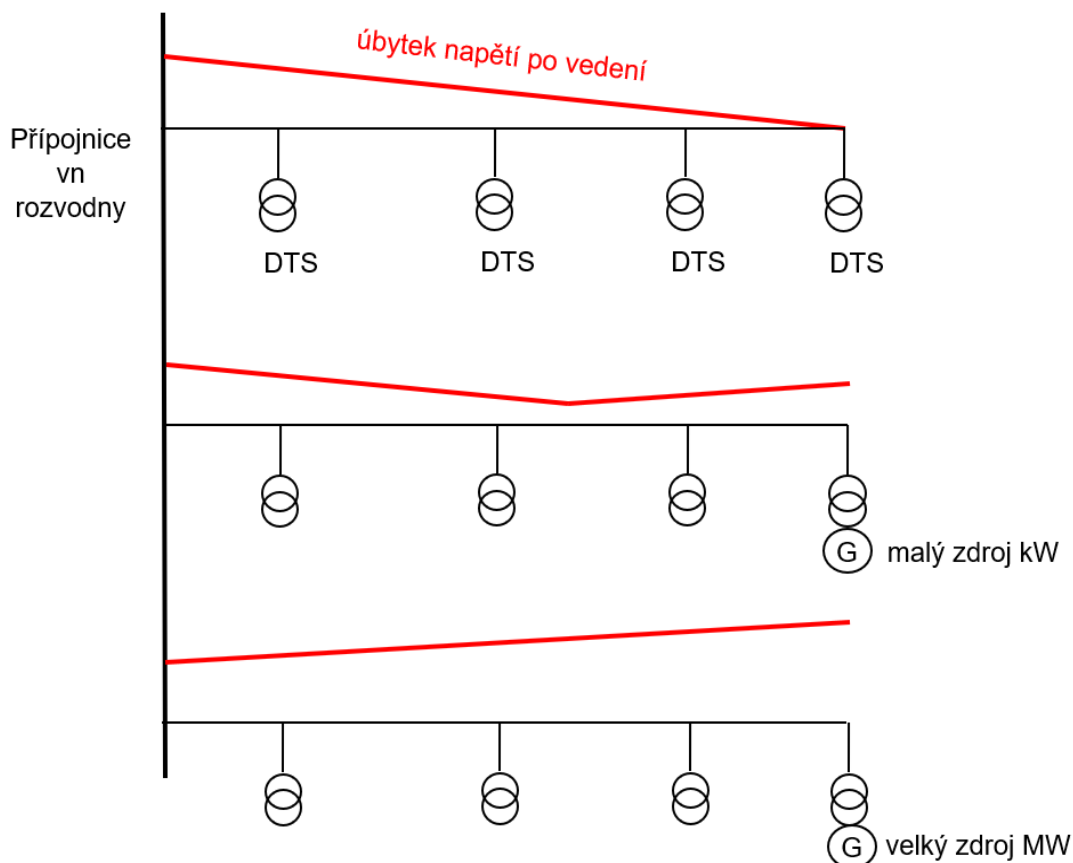
#### 4.1.7 Používané způsoby regulace $Q$ zdrojů

V současné době se nejvíce využívají tři způsoby regulace [1]:

- Konstantní  $\cos(\varphi)$ : účinník v místě připojení v povoleném rozsahu.
- Konstantní  $U$ : v místě připojení konstantní napětí tzv. (regulace  $U/Q$ ).
- Konstantní  $Q$ : regulace  $Q$  na nařízené dispečerem distributora, není vyhodnocován účinník.

#### 4.1.8 Vliv zdroje VN bez regulace $Q$ na napětí

Na Obr. 4-4 jsou znázorněny tři možné případy, které mohou nastat na vedení VN. V prvním případě není k vedení připojen žádný zdroj. Napětí klesá se vzdáleností od rozvodny. Ve druhém případě je na konec vedení připojen malý zdroj o instalovaném výkonu v řádech kW. Připojený zdroj dodává do sítě výkon, který spotřebují dvě trafostanice. Vedení se stává napájené ze dvou stran. Ve třetím případě je na konec vedení připojen velký zdroj o instalovaném výkonu v řádech MW. Zdroj dodává do sítě více výkonu, než jaký spotřebuje celé vedení. V místě jeho připojení je vyšší napětí než na přípojnicí rozvodny [1].



Obr. 4-4 Vliv zdroje VN bez regulace  $Q$  na napětí podél vedení [1]

#### 4.1.9 Významné tepelné elektrárny v oblasti Brno

V oblasti 1 (ve městě Brně) jsou instalovány především velké tepelné elektrárny (TPE) pro systémovou regulaci. Ovládané jsou lokálními dispečinkami. Pracují v rozsahu kruhového ( $P$ ,  $Q$ ) diagramu generátorů.

##### 4.1.9.1 Spalovna odpadu SAKO Brno a. s.

Směsný komunální odpad se využívá jako vstupní palivo pro dva kotle, které vyrábějí páru o tlaku 4 MPa a teplotě 400 °C. Vyrobená pára je dále využívána k dodávce tepla do centrálního zásobování teplem, výrobě elektřiny, výrobě horké vody a pro vlastní spotřebu spalovny [18].

Pára se dále odvádí do parní odběrové kondenzační turbíny, kde vykonává mechanickou práci pohonem lopatkového rotoru. Generátor, který je s převodovkou spojen s lopatkovým rotorem, transformuje mechanickou práci na elektrickou energii [18]. Použitý je synchronní generátor HTM-110z04, jmenovité hodnoty společně s kruhovým diagramem jsou uvedeny v příloze C, kruhový diagram na Obr. C-7.

##### 4.1.9.2 Teplárny Brno a. s. provoz Špitálka

Vstupním palivem pro kotle je zemní plyn. Veškerá pára vyrobená v kotlích prochází instalovanými protitlakými turbínami, ve kterých vykonává mechanickou práci na lopatkách rotoru. Rotor je na společné hřídeli se synchronním generátorem. Celkový instalovaný tepelný výkon objektu je 411 MWt a instalovaný elektrický výkon 80,6 MW [19]. Jmenovité hodnoty vybraného synchronního generátoru Škoda TG 20 jsou společně s kruhovým diagramem uvedeny v příloze C, kruhový diagram na Obr. C-8.

#### 4.1.9.3 Teplárny Brno a. s. provoz Červený mlýn

Vstupním palivem je zemní plyn. Výroba elektřiny je realizována v paroplynovém cyklu. Energie uložená v zemním plynu je nejprve přeměněna na mechanickou na lopatkách spalovací turbíny. Rotor je na společné hřídeli se synchronním generátorem o výkonu 70 MW. Následně je energie zemního plynu využita ve spalínovém kotli k výrobě páry, která pohání parní turbínu. K parní turbína roztáčí rotor druhého synchronního generátoru o výkonu 24 MW. Celkový instalovaný tepelný výkon je 140 MWt a elektrický výkon 95 MW [19]. Jmenovité hodnoty vybraného generátoru TLRI 86/29 jsou společně s kruhovým diagramem uvedeny v příloze C na *Obr. C-9*.

V provozu Červený Mlýn se přímo nachází zapouzdřená rozvodna 110 kV Brno – Červený Mlýn (CML), která je kabely propojena s rozvodnou Brno – Medlánky (MEY) a s rozvodnou Brno – Příkop (BNP).

## 5 HROMADNÁ REGULACE JALOVÉHO VÝKONU DECE

Předpokládaný rozvoj DECE na úkor velkých systémových elektráren bude mít vliv na provoz sítí všech napětových hladin. Vliv výroby DECE se projeví např. v přenosové soustavě provozním odlehčením. V takovémto případě bude nutné především regulovat toky jalového výkonu v předávacích místech DS s PS.

V současné době lze požadovanou změnu jalového výkonu DECE v DS E.ON provádět pouze individuálně pro každý zdroj. Regulací účinníku  $\cos(\varphi)$  v rozsahu 0,95 (ind.) – 1 – 0,95 (kap.). Řídící informační systém prozatím neumožňuje efektivní regulaci účinníku, proto bude přidána funkce, která bude umožňovat hromadnou regulaci zdrojů na požadovaný účinník. Hromadným příkazem bude zajištěna efektivní regulace a zároveň snadnější predikce výsledku regulace.

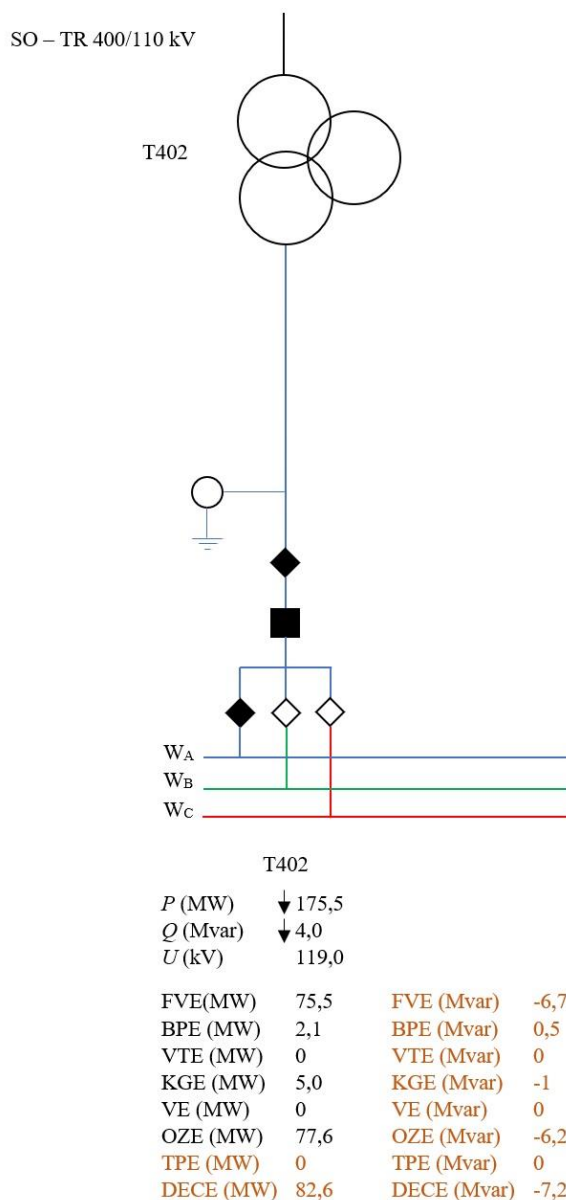
U nově připojovaných zdrojů, je nyní požadována regulace účinníku v rozsahu  $\pm 0,9$ . Hromadná regulace bude provádět regulaci pro všechny zvolené zdroje ve vybraných oblastech, ve stupních 0,9 (ind.) – 0,95 – 0,97 – 1 – 0,97 – 0,95 – 0,9 (kap.). Při zadání povelu účinníku 0,9 nastaví zdroje, které umožňují regulaci účinníku v rozsahu  $\pm 0,95$ , svůj maximální rozsah v požadovaném směru. Hromadná regulace se bude zadávat dle aktuálních potřeb, při současném dodržení podmínek pro řízení.

### 5.1 Návrh hromadných povelů

Hromadnou regulaci účinníku bude možné zadávat dle situace na základě aktuálních potřeb. Připojené výrobní bude možné regulovat dle následujících rozdělení:

1. Dle oblastí:
  - Jednotlivé transformátory (TR) PS/110 kV
    - U paralelních provozů TR aktivace u jednoho, současně proběhne u všech propojených TR
  - Jednotlivé TR 110/22 kV
  - Jednotlivé vývody 22 kV
2. Dle typu zdroje:
  - FVE, BPE, KGE, VE, VTE, TPE, DECE

Společně s hromadnou regulací bude do DŘS přidán i dynamický dopočet jalového výkonu a rozšířen dynamický dopočet činného výkonu o TPE a DECE. Dynamický dopočet činného výkonu slouží pro přehled sledování aktuálního odběru/dodávky činného výkonu u vybraného prvku. Současné i budoucí zobrazované hodnoty dynamického dopočtu jsou zobrazeny na Obr. 5-1, kde jsou znázorněny pod transformátorem 400/110 kV v rozvodně Sokolnice (SO). Černou barvou vyznačené hodnoty jsou přístupné v současnosti, oranžovou barvou jsou vyznačeny nové doplňující hodnoty. Hodnoty  $P$ ,  $Q$ ,  $U$  jsou aktuální hodnoty na sekundární straně transformátoru, další hodnoty (FVE, BPE, VTE, KGE, VE, OZE, TPE, DECE) jsou hodnoty zdrojů aktuálně působících v celé napájecí oblasti TR.



Obr. 5-1 Zjednodušený návrh dynamických dopočtů pro SO T402 v DŘS

Na Obr. 5-2 je navržena ukázka možného grafického rozhraní pro hromadnou regulaci účinníku v DŘS. Konkrétně je uvedeno rozhraní pro rozvodnu Sokolnice, transformátor 400/110 kV (T 402), regulace je zvolena pro FVE v celé napájecí oblasti. V levé části je aktuálně nastavená regulace, v pravé části je zobrazeno výběrové okno se všemi stupni regulace. Stisknutím tlačítka „Přehled zdrojů“ se provede výpis všech zdrojů, zdrojů neregulovaných a regulovaných na nižší hodnotu účinníku. Stisknutím tlačítka „Výpočet“ a „Výsledek“, se provede výpočet chodu sítě s uvažovaným stupněm regulace a zobrazí se predikované výsledky. Tlačítko „Proved“ potvrdí zadanou hromadnou regulaci.

Hromadné řízení cos fi		Hromadné řízení cos fi	
SO T402	FVE	SO T402	FVE
KAP více U    IND méně U		KAP více U    IND méně U	
Automatická regulace Q blokována <input type="checkbox"/>		Automatická regulace Q blokována <input type="checkbox"/>	
Regulace Q cos fi	<input type="text" value="1"/> <input type="button" value="Proveď"/>	Regulace Q cos fi	<input type="button" value="0,9 kap"/> <input type="button" value="0,9 ind"/> <input type="button" value="0,95 kap"/> <input type="button" value="0,95 ind"/> <input type="button" value="0,97 kap"/> <input type="button" value="0,97 ind"/> <input type="button" value="1"/> <input type="button" value="Proveď"/>
<input type="button" value="Přehled zdrojů"/> <input type="button" value="Výpočet"/> <input type="button" value="Výsledek"/>		<input type="button" value="Přehled zdrojů"/> <input type="button" value="Výpočet"/> <input type="button" value="Výsledek"/>	

Obr. 5-2 Návrh vzhledu hromadné regulace v DŘS

## 5.2 Podmínky pro řízení

Pro hromadnou regulaci byly stanoveny následující podmínky, které jsou nezbytné pro zajištění bezpečného chodu sítě.

Zadáním hromadné regulace  $Q$  DECE, musí být automaticky zablokována automatická regulace účinnosti decentrálních zdrojů (regulace  $U/Q$ ) u zdrojů, které se účastní hromadné regulace. Požadovaný účinník se nastaví u všech DECE (nebo zvoleného typu zdroje) s dálkovou regulací  $Q$  pouze v určené oblasti. Zároveň nesmí dojít k regulaci  $P$ . Z hromadné regulace půjde dle potřeby vyjmout jednotlivé DECE, jednotlivé vývody 22 kV případně jednotlivé oblasti 110/22 kV.

Před provedením hromadné regulace musí být provedena výpočetní kontrola chodu sítě s uvažováním  $Q$  po regulaci dle zadaného účinníku, při uvažování maximálního dosažitelného výkonu  $P$ ,  $Q$  jednotlivých DECE v zadaném účinníku. V případě, kdy v místě připojení nebude hodnota napětí v požadované mezi, sníží se stupeň účinníku v požadovaném směru, nebo se vrátí na  $\cos(\varphi) = 1$ . Následně se provede výpis regulovaných DECE na nižší hodnotu účinníku (nesplněné limity pro  $U$ ) a neregulovaných DECE.

## 6 ZKOUŠKA OVLIVNĚNÍ JALOVÉHO VÝKONU

Dne 29. 7. 2018 byla provedena zkouška ovlivnění jalového výkonu v předávacím bodě distribuční a přenosové soustavy v rozvodně Sokolnice (transformátor 400/110 kV - T402).

Zkouška byla provedena za účelem ověření možnosti regulace účinníku DECE (z 98 % zastoupeny OZE) v síti 22 kV pomocí dálkové regulace z DŘS. Pro účely zkoušky byla zvolena napájecí oblast, ve které se nachází vysoký počet DECE s možností dálkové regulace  $Q$ . Celá oblast byla nestandardně napájena T402. V termínu zkoušky napájel T402 větší oblast DS, než kterou napájí ve standardním provozu, protože v rozvodně Sokolnice probíhala výměna TR 220/110 kV (T203) za TR 400/100 kV (T403). Vybrané zdroje, které měly aktuálně fungující dálkovou regulaci  $Q$  jsou uvedeny v *Tab. 6-1*. Nejedná se o všechny zdroje v oblasti, nýbrž pouze o zdroje předem určené s regulací  $Q$ . Největší zastoupení měly FVE, dále byly vybrány BPE a KGE.

*Tab. 6-1 Vybrané zdroje v oblasti T402 s dálkovou regulací  $Q$  [13]*

Typ zdroje	Počet	$P_i$ (MW)
FVE	52	118
BPE	6	8
KGE	1	4
Všechny	59	130

### 6.1 Harmonogram zkoušky

- V pátek 27. 7. 2018 ve večerních hodinách zablokována automatická regulace  $U/Q$  na zvolených zdrojích
- Neděle 29. 7. 2018 den zkoušky (předpoklad dodávky jalového výkonu v oblasti T402)
  - V 9:00 hod. začátek zkoušky, regulace účinníku zdrojů na účinník 0,95 (ind.)
  - V 16:00 hod. návrat účinníku zdrojů z 0,95 (ind.) na 1 a ukončení zkoušky
  - Odblokována automatická regulace  $U/Q$  na zvolených zdrojích

### 6.2 Vyhodnocení

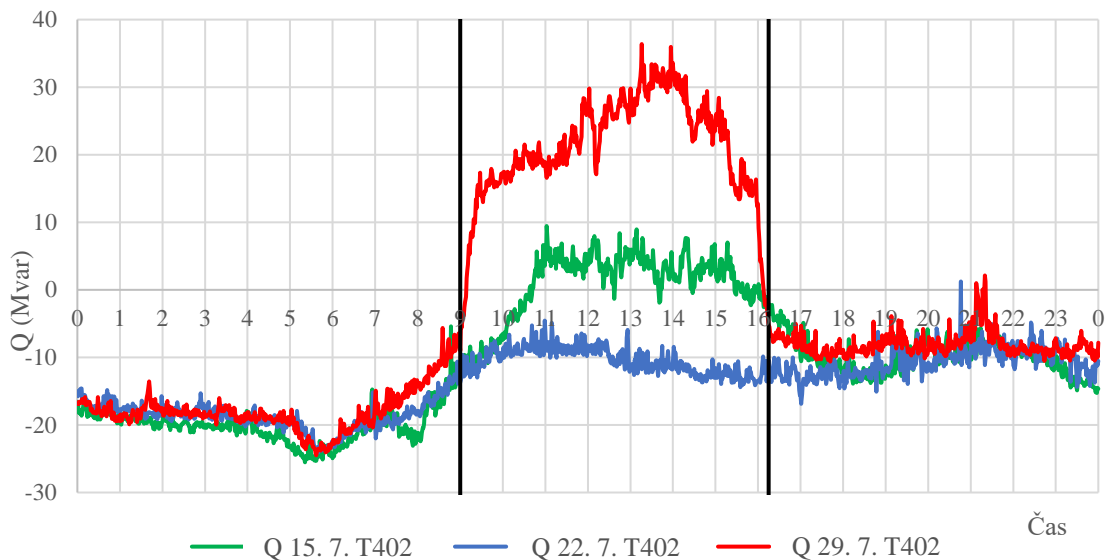
V neděli 29. 7. 2018 v 9:00 hod. začala regulace účinníku z 1 na 0,95 (ind.) dispečerem 22 kV po jednotlivých zdrojích. Všechny zdroje byly zregulovány do 1 hod. Obdobně pak v 16:00 hod. začal návrat účinníku na hodnotu 1, individuálně pro každý zdroj. Na následujících obrázcích jsou uvedeny výsledky zkoušky.

Na *Obr. 6-1* je zobrazen vývoj jalového výkonu na T402 pro den zkoušky a dvě neděle předcházející zkoušce. V nedělní a sobotní dny příp. státní svátky nastává v napájecí oblasti T402 proti ostatním dnům dodávka jalového výkonu do přenosové soustavy.

Odběr činného výkonu sítě 22 kV je nízký vlivem výroby DECE, může nastávat i dodávka činného výkonu do sítě 110 kV. Vysoký podíl DECE pokrývá spotřebu v sítích 22 kV a způsobuje nižší zatížení sítě 110 kV.

V neděli 15. 7. 2018 na T402 mezi 10:45 a 16:00 hod. nenastává přetok jalového výkonu, naopak dochází k odběru. Tento odběr je způsoben malou výrobou FVE, která byla zapříčiněna nepříznivým počasím. DECE se významně nepodílely na pokrytí spotřeby, sítě 110 kV byly významně zatíženy.

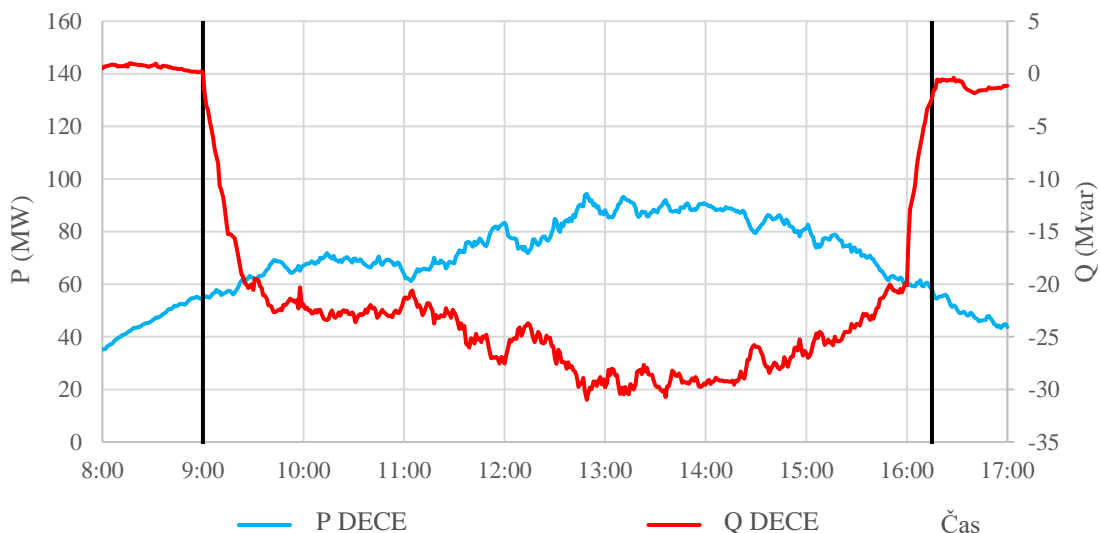




Obr. 6-1. Vývoj jalového výkonu na T402 v nedělní dny [13]

Na Obr. 6-2 je uveden celkový vývoj činného a jalového výkonu všech DECE v oblasti zkoušky, které umožňovali regulaci účinníku. Je použita odlišná znaménková konvence. Jedná se o sledování vývoje výroben (zdrojů). Kladné znaménko znamená dodávku do sítě 22 kV, záporné znaménko indikuje odběr ze sítě 22 kV.

V neděli 29. 7. 2018 bylo pro FVE relativně příznivé počasí – polojasno bez přeháněk. V odpoledních hodinách 12:30 – 14:30 hod. se výroba činného výkonu  $P$  DECE všech zdrojů blížila až ke 100 MW (při instalovaném výkonu 130 MW). Jalový výkon odebíraný regulovanými zdroji v době nejvyšší výroby činného výkonu dosahoval hodnot přes 30 Mvar.

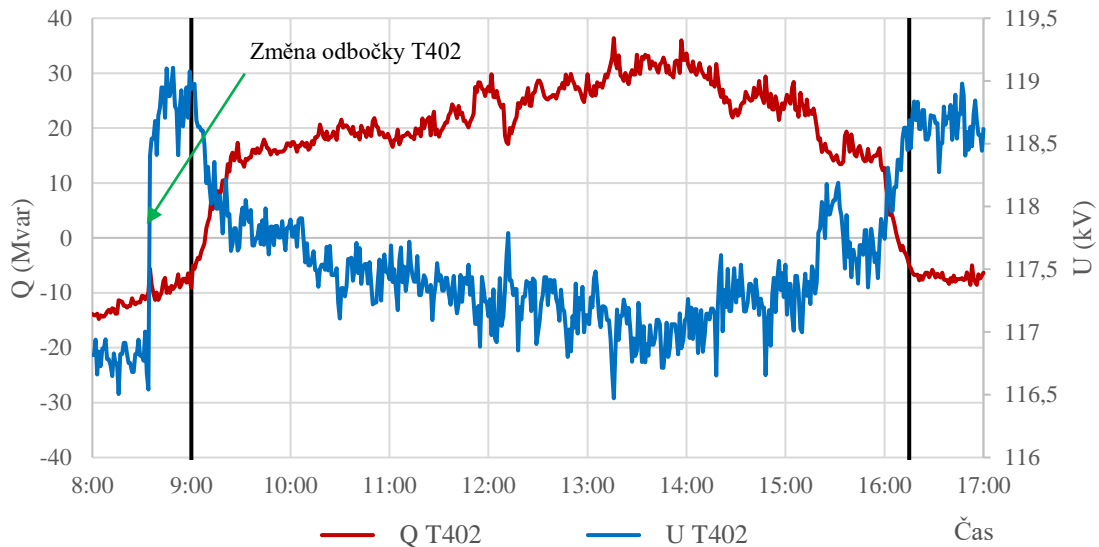


Obr. 6-2 Vývoj činného a jalového výkonu DECE v oblasti T402 [13]

Na Obr. 6-3 je znázorněn průběh sdruženého napětí 110 kV na svorkách sekundární strany SO T 402. Skokové zvětšení napětí v cca 8:30 hod. před zkouškou je způsobeno změnou odbočky transformátoru, další regulace napětí změnou odbočky již během zkoušky na T402 neproběhla.

Z Obr. 6-3 je patrné, že během zkoušky docházelo dle vývoje jalového výkonu ke změnám napětí. Na začátku zkoušky v 9:00 hod. při dodávce  $Q$  do PS je sdružené napětí  $U_{12}$  rovno 119 kV.

S rostoucím odběrem činného a jalového výkonu dochází dle předpokladu k úměrnému snižování  $U_{12}$ . Po 14:00 hod. dochází ke snížení odběru  $Q$  a současně dochází i k pozvolnému nárůstu  $U_{12}$ , zpět na hodnotu cca 119 kV se  $U_{12}$  dostává po ukončení zkoušky. Během zkoušky nedošlo ke změně odbočky, protože pokles sdruženého napětí v síti 110 kV byl v rámci necitlivosti regulátoru napětí.



Obr. 6-3 Průběh jalového výkonu a sdruženého napětí SO T402 v čase zkoušky [13]

Během zkoušky nedošlo v předmětné oblasti v žádném z měřených bodů sítě k podpětí. Zkouškou bylo ověřeno, že v napájecí oblasti SO T402 lze regulací účinníku DECE o celkovém instalovaném výkonu 130 MW dosáhnout hodnoty jalového výkonu cca 30 Mvar, v případě ideálního počasí lze uvažovat dosažení až 40 Mvar. Zásadní vliv na výsledek ovlivnění  $Q$  má v této oblasti, kde je největší zastoupení FVE, denní doba a aktuální klimatické podmínky.

## 7 ANALÝZA NA ÚROVNI ROZVODEN 110/22 kV

Nárůst decentralních zdrojů energie způsobuje změny toků činných a jalových výkonů v distribuční soustavě napříč různými napěťovými hladinami. Vlivem rozdílné výroby a spotřeby elektrické energie dochází k proměnlivým výkonovým tokům v určitých obdobích dochází i zpětným tokům výkonu do nadřazené soustavy [20]. Na změny toků jalových výkonů má vliv především změna trendu technologie výstavby vedení 22 kV a 110 kV, především nárůstem podílu kabelových vedení. Dalším vlivem je také změna charakteru odběru jalové energie u běžných domácích spotřebičů způsobený například velkým nárůstem elektroniky [21].

### 7.1 Analýza dodané energie na celém distribučním území E.ON

Za období roků 2013–2018 je patrný trend zvyšující se spotřeby. Rostoucí ekonomika způsobuje rozvoj průmyslu. S rostoucím průmyslem narůstá i spotřeba, dalším vlivem jsou nové technologie v domácnostech, nové spotřebiče jsou sice úsporné, ale jejich počet se značně zvyšuje. V roce 2013 dle Tab. 7-2 byla celková spotřeba 12 926 GWh za poslední uplynulý rok 2018 byla celková spotřeba 14 213 GWh.

V Tab. 7-1. jsou uvedena data nejvyššího a nejnižšího zatížení sítě (hodnoty zvýrazněny tučně). Nejvyšší zatížení nastává zpravidla v zimních měsících, za poslední roky nastalo nejčastěji v lednu během pracovního dne v dopoledních či odpoledních hodinách. Nejvyšší zatížení je spjato s chladným počasím. Elektrinu využívají k vytápění z největší míry průmyslové podniky a kancelářské budovy a při celodenních mrazech spotřebu ovlivňuje nejvíce právě vytápění. V zimních měsících jsou navíc kladeny vyšší nároky na osvětlení než v letních měsících. Nejnižší zatížení nastává v letních měsících. Zpravidla se jedná o nepracovní dny, večerní a noční hodiny. Častým jevem je shoda maximálního/minimálního zatížení sítě s nejvyšší dodanou energií. Za posledních 6 let ve čtyřech případech (roky 2013, 2014, 2016, 2017) nastalo maximální zatížení sítě společně s nejvyšší dodanou energií.

Tab. 7-1 Měsíční maxima zatížení distribuční soustavy [13]

Měsíc	Rok					
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
	<i>P</i> (GW)	<i>P</i> (GW)	<i>P</i> (GW)	<i>P</i> (GW)	<i>P</i> (GW)	<i>P</i> (GW)
1	<b>2,174</b>	<b>2,189</b>	2,175	<b>2,379</b>	<b>2,541</b>	2,376
2	2,117	2,106	2,125	2,224	2,426	<b>2,566</b>
3	2,110	1,936	2,058	2,229	2,165	2,565
4	2,031	1,891	2,045	2,089	2,190	2,060
5	1,786	1,858	1,870	2,002	2,055	1988
6	1,817	1,765	<b>1,805</b>	2,024	1,905	1,969
7	<b>1,736</b>	<b>1,753</b>	1,869	1,946	1,908	<b>1,900</b>
8	1,748	1,784	1,835	<b>1,943</b>	<b>1,841</b>	1,940
9	1,803	1,822	1,940	1,959	2032	1,975
10	1,918	2,009	2,138	2,120	2,192	2,071
11	2,130	2,124	<b>2,202</b>	2,320	2,320	2,226
12	2,100	2,194	2,195	2,366	2,364	2,367

Tab. 7-2 Celková dodaná energie na celém distribučním území [13]

Měsíc	Rok					
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
	<i>Eč</i> (GWh)	<i>Eč</i> (GWh)	<i>Eč</i> (GWh)	<i>Eč</i> (GWh)	<i>Eč</i> (GWh)	<i>Eč</i> (GWh)
1	<b>1 261</b>	<b>1 214</b>	<b>1 236</b>	<b>1 361</b>	<b>1 508</b>	1 376
2	1 141	1 105	1 139	1 220	1 278	1 319
3	1 207	1 109	1 182	1 267	1 278	<b>1 401</b>
4	1 051	1 021	1 065	1 162	1 156	1 102
5	984	1 014	1 034	1 157	1 130	1 077
6	<b>961</b>	966	<b>1 013</b>	1 072	1 088	1 088
7	963	990	1 049	<b>1 032</b>	<b>1 025</b>	<b>1 056</b>
8	972	<b>962</b>	1 038	1 075	1 071	1 105
9	994	1 008	1 055	1 075	1 099	1 078
10	1 102	1 089	1 215	1 210	1 198	1 167
11	1 145	1 118	1 212	1 282	1 290	1 192
12	1 144	1 153	1 191	1 311	1 293	1 252
Součet	12 926	12 749	13 427	14 225	14 414	14 213

## 7.2 Popis analyzovaných oblastí

Základní analýza byla provedena pro dvě, provedením odlišné, oblasti. Hodnocena je distribuční síť části města Brna a jeho bezprostředního okolí (oblast 1). Předmětem hodnocení je dále distribuční síť lokalizovaná mimo infrastrukturu velkého města. Tato odpovídá charakteristickou spíše venkovským lokalitám, tzn. je hodnocen region jižně od Brna společně s regiony Břeclavska a Znojemska (oblast 2).

Hodnocené oblasti se odlišují v provedení distribučního vedení. Pro oblast 1 je charakteristické především kabelové vedení 22 kV a 0,4 kV. V Oblasti 2 převládají na úrovni 22 kV a 0,4 kV sítě venkovního vedení. Provoz venkovního vedení oproti kabelovému, jakožto síťových prvků, se významně nepodílí na ovlivňování toků jalové energie. Oblasti se významně odlišují také ve skladbě zdrojů připojených do DS, které mají nezanedbatelný vliv na chod DS a přímo ovlivňují také toky energií přes transformátory.

### 7.2.1 Oblast 1

Předmětem hodnocení je 15 rozvoden 110/22 kV, které jsou dálkově monitorovány a řízeny z dispečerského řídicího systému. Současně jsou tyto rozvodny osazeny monitorováním rozvodné sítě a zdrojů na hladině 22 kV. Napájení DS je zajištěno převážně z PS prostřednictvím nadřazených transformačních stanic Čebín (CNT) a Sokolnice (SO). Zbylé napájení zajišťují decentrální zdroje. Ve městě Brně to jsou především velké tepelné zdroje pro systémovou regulaci, např. Teplárny Brno a. s. provoz Červený mlýn s instalovaným elektrickým výkonem 95 MW, provoz Špitálka s 80,6 MW, nebo spalovna odpadu SAKO Brno a. s. s 22,7 MW. Dále jsou do hladiny 22 kV zapojeny menší zdroje fotovoltaické elektrárny (FVE), bioplynové elektrárny (BPE) a kogenerační jednotky (KGE).

Na úrovni 110 kV je použito převážně venkovní vedení, kabelové vedení je použito částečně mezi několika rozvodnami, například mezi Brno – Medlánky (MEY) a Brno – Červený Mlýn (CML). DS na úrovni 22 kV a 0,4 kV je v městské zástavbě realizována výhradně kabelovým

vedením. Velmi malá část je realizována jako venkovní vedení. Venkovní vedení je užito výjimečně např. v městské části Líšeň a v příměstských oblastech jako jsou například Soběšice, Česká a Lelekovice.

### 7.2.2 Oblast 2

V rámci hodnocení této oblasti bylo hodnoceno 10 rozvoden 110/22 kV, které jsou stejně jako v oblasti 1 dálkově monitorovány a řízeny z dispečerského řídicího systému a současně zajišťují monitorování rozvodné sítě a zdrojů na hladině 22 kV. Napájení DS je zajištěno převážně z přenosové soustavy prostřednictvím nadřazené transformační stanice Sokolnice. Zbylé napájení zajišťují menší decentrální zdroje FVE, BPE, KGE, VE a VTE. Do hladiny 22 kV je celkem připojeno 124 výroben s celkovým instalovaným výkonem 217 MW. V této oblasti je největší koncentrace výskytu fotovoltaických elektráren připojených do hladiny 22 kV z celé ČR. Celkový počet je 99 s celkovým instalovaným výkonem 172,5 MW.

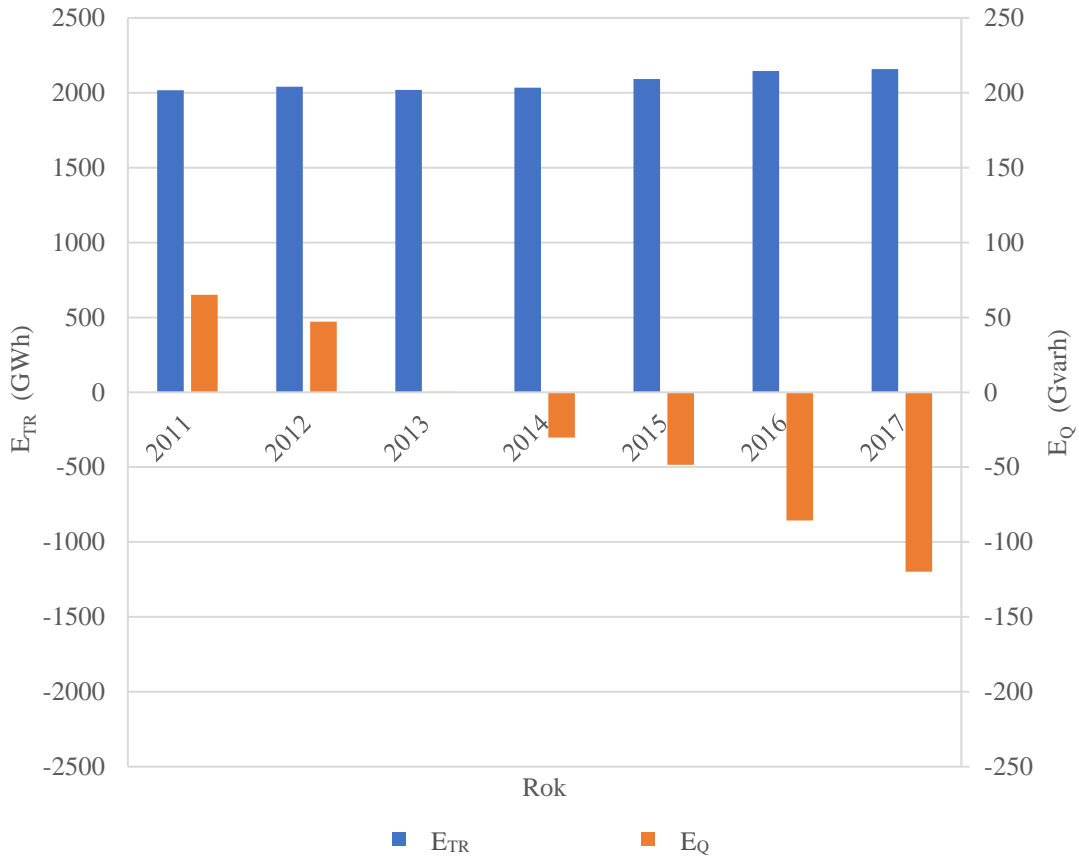
Rozvodná soustava je na všech napětových hladinách realizována převážně venkovním vedením. Na úrovni 110 kV je použito pouze venkovní vedení. Kabelové vedení na úrovni 22 kV je proti oblasti 1 použito ve velmi malé míře, převážně v obydlených aglomeracích.

## 7.3 Analýza toků činné a jalové energie

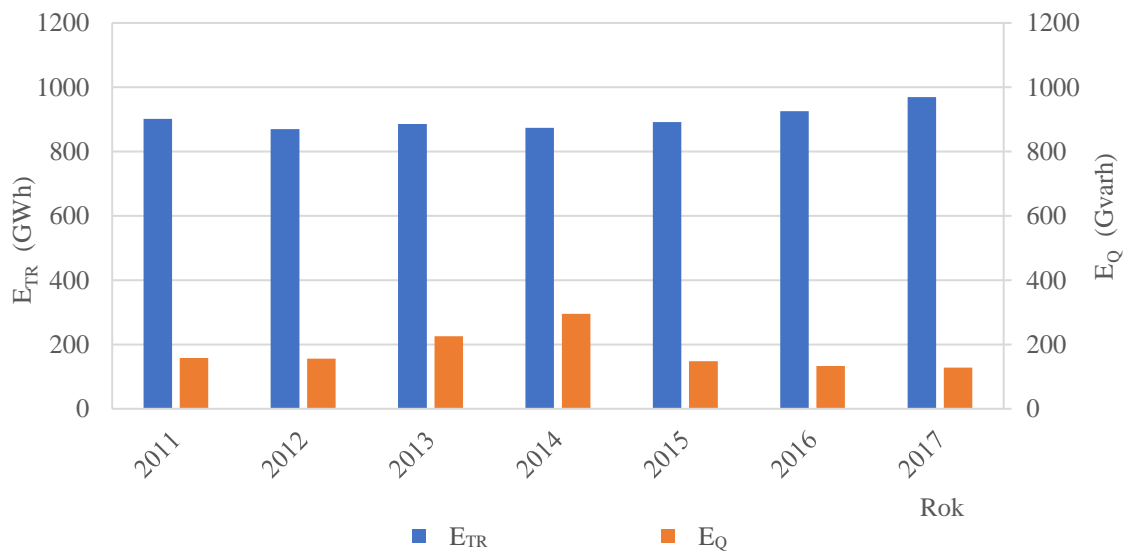
Vyhodnocení provozu obou oblastí je provedeno na základě dat, která byla získána ze standardního trvale instalovaného měření na sekundární straně transformátorů 110/22 kV. Použity byly průměrné hodnoty činného a jalového výkonu na transformátorech a průměrné hodnoty činného výkonu z DECE. Jedná se o hodinové průměrné hodnoty za období od roku 2011 až do 2017. V případech, kdy došlo k výpadku měření případně chybné komunikaci přístrojů, byla změřená data během tohoto výpadku vyloučena.

Při vyhodnocování byla použita následující znaménková konvence. Kladné znaménko znamená, že energie byla sítí 22 kV odebírána, naopak záporné znaménko znamená dodávku (přetok) energie ze sítě 22 kV do 110 kV. Činná energie z DECE je označena  $E_{DECE}$  jedná se o dodanou energii do sítě 22 kV zdroji FVE, BPE, KGE a VE tepelné elektrárny nebyly dispečerským systémem započítány.  $E_{TR}$  je výsledná činná energie na transformátorech 110/22 kV. Celková jalová energie  $E_Q$  ukazuje celkový výsledný charakter toku jalové energie.

Na *Obr. 7-1* a *Obr. 7-2* jsou zobrazeny celkové bilance za jednotlivé analyzované roky pro vybrané oblasti. Zobrazeny jsou celkové hodnoty činné energie  $E_{TR}$  a jalové energie  $E_Q$ .



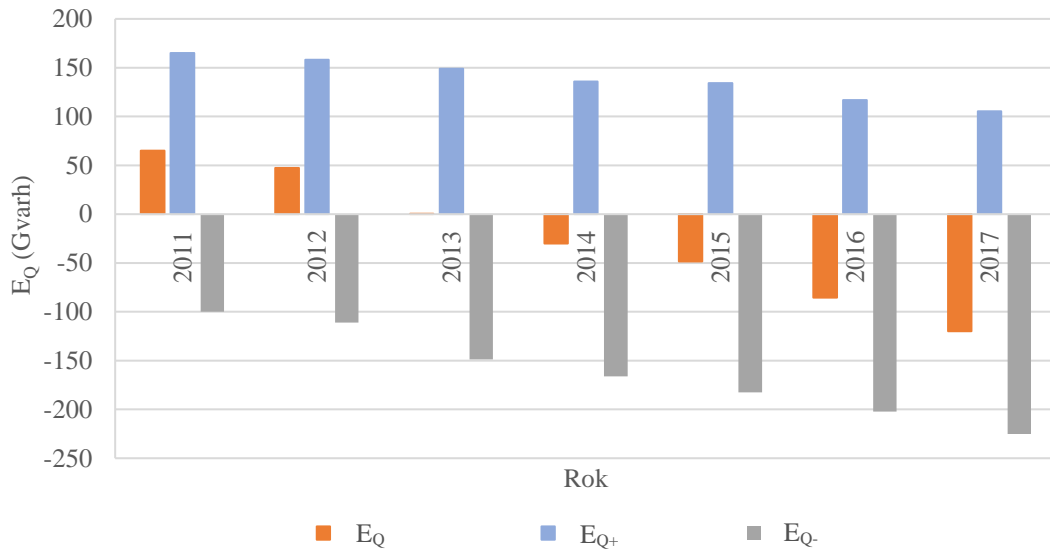
Obr. 7-1 Vývoj činné a jalové energie mezi 2011-2017 v oblasti 1



Obr. 7-2. Vývoj činné a jalové energie mezi 2011-2017 v oblasti 2

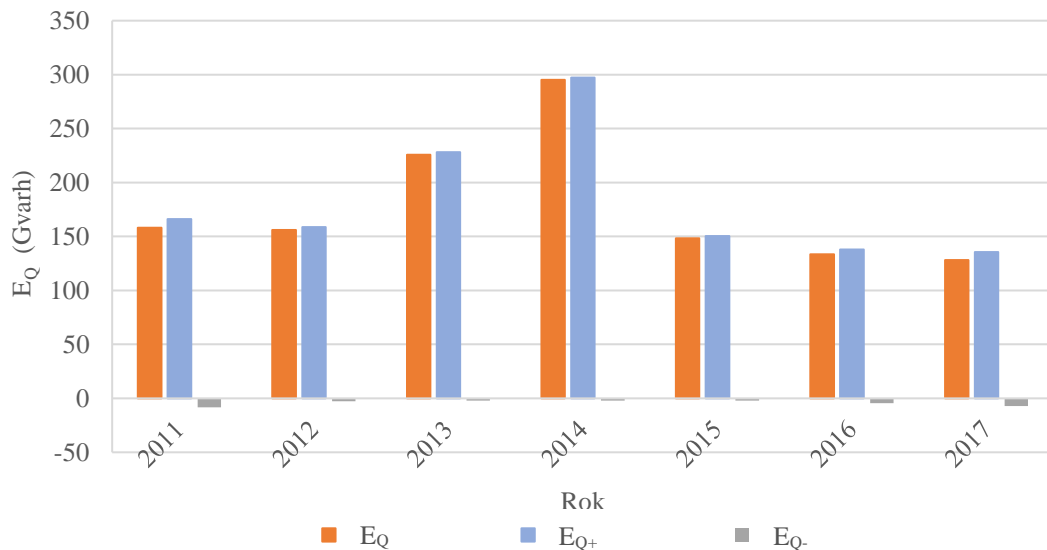
Zřejmá je tendence zvyšujícího se odběru činné energie v obou oblastech. Mezi roky 2011 a 2013 v síti oblasti 1 převládá odběr jalové energie. V roce 2013 se dodávka jalové energie téměř vyrovnala odběru. Od roku 2014 převládá dodávka (tj. přetok) jalové energie do nadřazené soustavy s každoročním nárůstem. V Oblasti 2 převládá odběr jalové energie po celé sledované období.

Obr. 7-3 a Obr. 7-4 ukazují jednotlivé roční bilance jalové energie. Celková jalová energie  $E_Q$  je součtem jalové energie  $E_{Q-}$  a  $E_{Q+}$ .  $E_{Q-}$  označuje množství energie dodané ze sítě 22 kV a  $E_{Q+}$  je označená energie dodaná do sítě 22 kV.



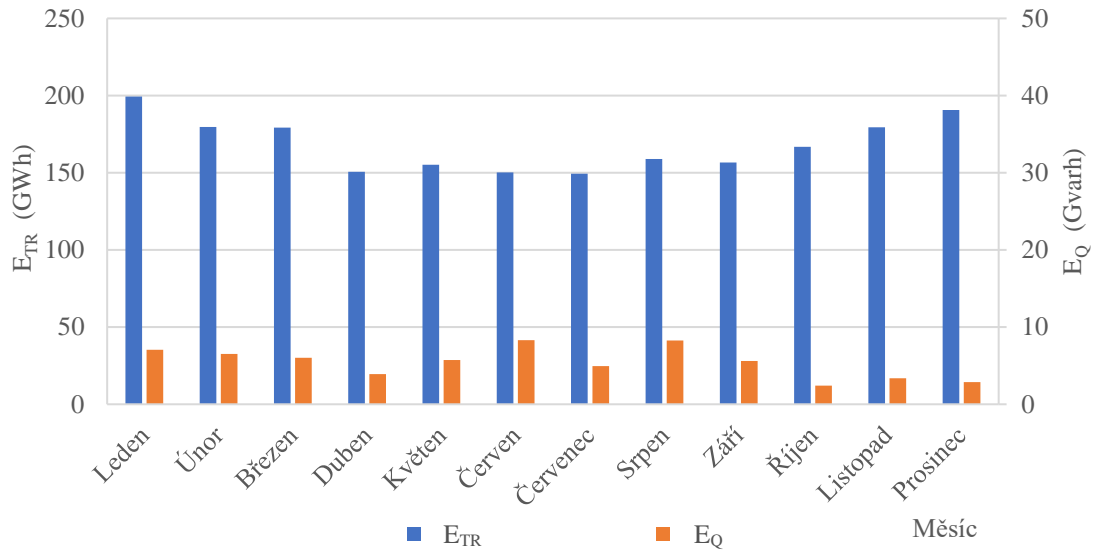
Obr. 7-3. Detailní vývoj jalové energie mezi 2011-2017 v oblasti 1

V oblasti 1 od roku 2011 postupně dochází k poklesu odběru a současně dochází ke zvyšování dodávky tzv. přetoku do nadřazené soustavy. Od roku 2014 již dodávka sítě 22 kV převažuje nad odběrem. V oblasti 2 převládá odběr jalové energie po celé sledované období.

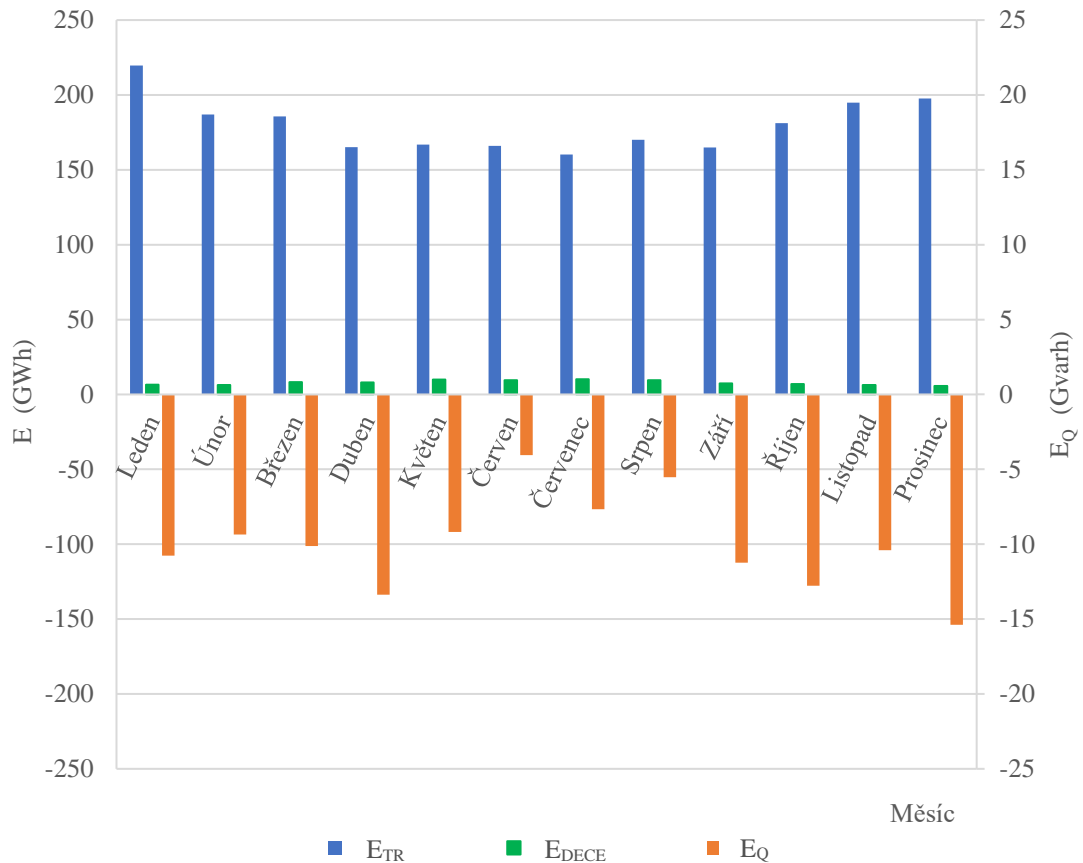


Obr. 7-4. Detailní vývoj jalové energie mezi 2011-2017 v oblasti 2

Během roku nedochází v jednotlivých měsících k rovnoměrnému odběru. Na Obr. 7-5, Obr. 7-6, Obr. 7-7 a Obr. 7-8 je pro porovnání ukázán vývoj  $E_{TR}$  a  $E_Q$  v jednotlivých měsících roku 2011 a 2017. Pro rok 2017 jsou přidána dostupná data vývoje činné energie z decentralních zdrojů  $E_{DECE}$ .

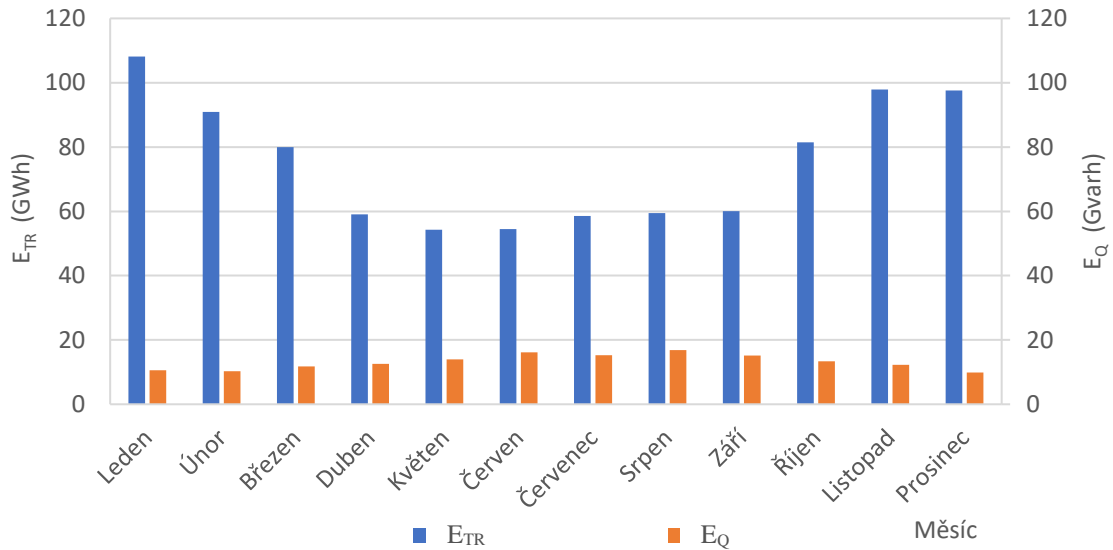


Obr. 7-5. Vývoj činné a jalové energie v roce 2011 oblast 1

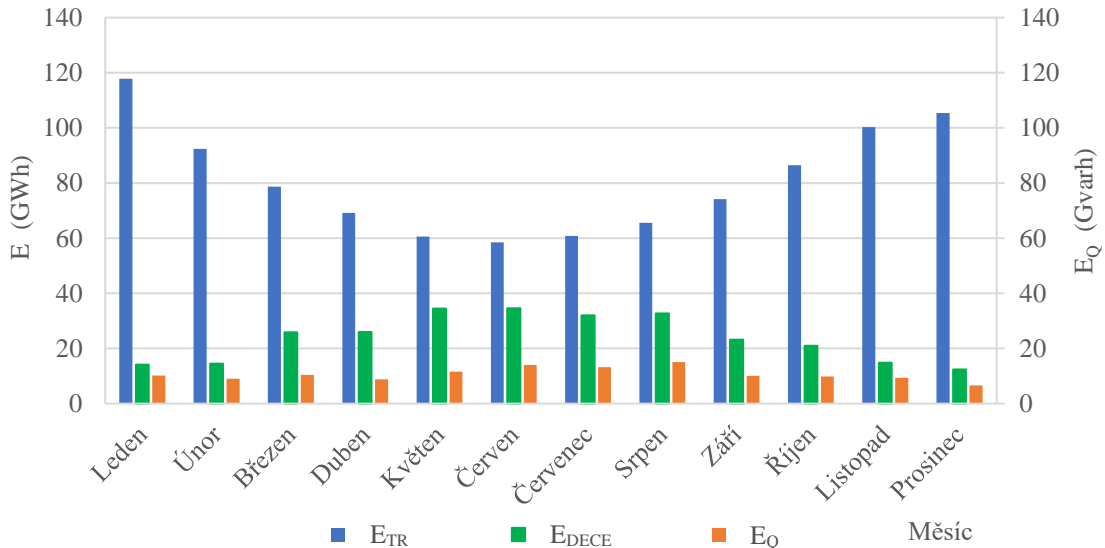


Obr. 7-6. Vývoj činné a jalové energie v roce 2017 oblast 1





Obr. 7-7. Vývoj činné a jalové energie v roce 2011 oblast 2



Obr. 7-8. Vývoj činné a jalové energie v roce 2017 oblast 2

Spotřeba elektrické energie se během roku mění v závislosti na ročním období. V zimních měsících je spotřeba elektrická energie vyšší než v letních měsících, protože je využívána například k vytápění. V letních měsících spotřeba klesá, soustava je méně zatížena.

Vlivem příznivého počasí narůstá v letních měsících výroba elektřiny z DECE především z fotovoltaických elektráren, které dle Tab. 4-1 a Tab. 4-2 mají z energetického mixu DECE největší celkový instalovaný výkon.

## 7.4 Analýza činného a jalového výkonu

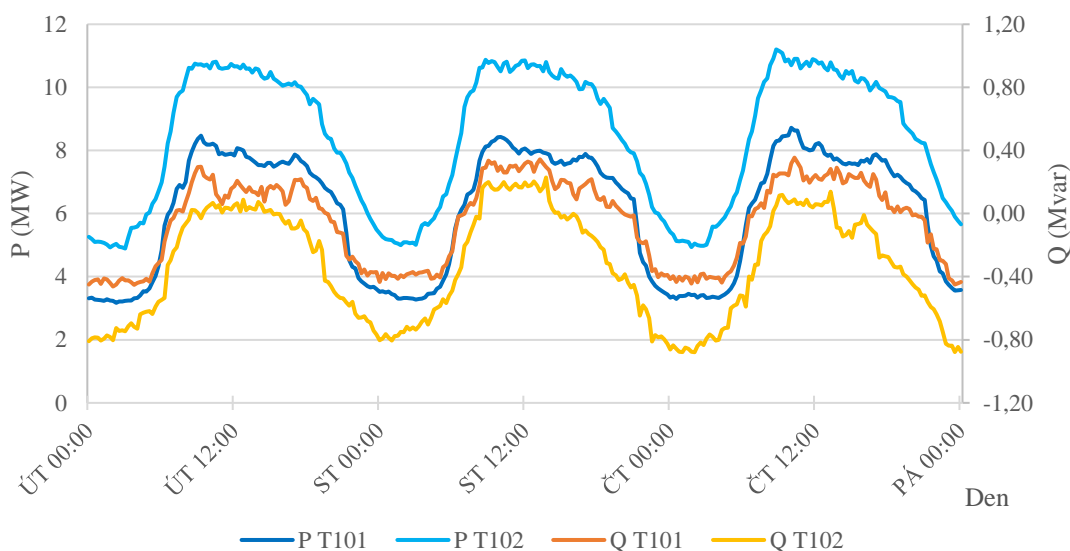
Analýza byla provedena pro dvě rozvodny z oblasti 1 a oblasti 2 na základě dat, která byla získána ze standardního trvale instalovaného měření na sekundární straně transformátorů 110/22 kV. Použity byly průměrné hodnoty činného a jalového výkonu na transformátorech a průměrné hodnoty činného výkonu z DECE. Jedná se o patnácti minutové průměrné hodnoty, tzn. pro každou veličinu je za časový interval k dispozici pouze jedna hodnota.

Byla použita následující znaménková konvence. Kladné znaménko znamená, že výkon byl v daném okamžiku sítě 22 kV odebrán, naopak záporné znaménko znamená aktuální dodávku výkonu ze sítě 22 kV do 110 kV.

V oblasti 1 byla analyzována rozvodna Brno-Opuštěná (BNO). V rozvodně jsou instalovány 2 transformátory 110/22 kV každý o výkonu 40 MVA. Transformátory jsou označeny T101 a T102. V oblasti rozvodny není k síti 22 kV připojený žádný decentralizovaný zdroj.

Činný výkon na transformátoru T101 je označený  $P_{T101}$ , na druhém transformátoru T102 je označený  $P_{T102}$ . Jalový výkon  $Q$  je dle transformátoru, označen  $Q_{T101}$  a  $Q_{T102}$ .

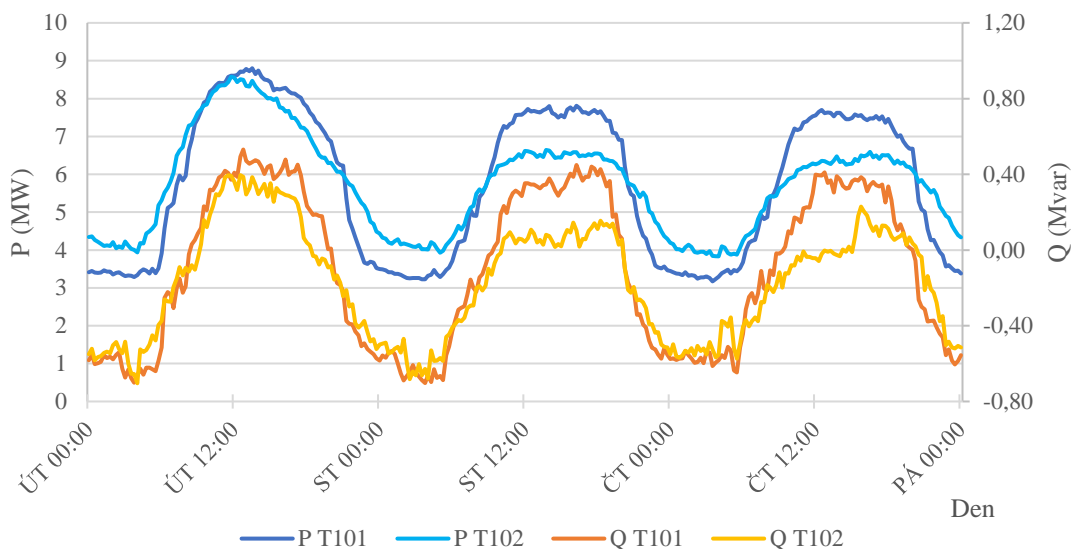
Na Obr. 7-9 je zobrazen vývoj činného a jalového výkonu v rozvodně BNO pro zimní zatížení. Zimní zatížení se vyhodnocuje vždy třetí středu v novém roce. Zobrazeny jsou 3 pracovní dny 17. 1. 2017 (úterý) až 19. 1. 2017 (čtvrtek). Je zřejmé, že vývoj činného a jalového výkonu v průběhu dne závisí především na denní době, od které se odvíjí spotřeba. V brzkých ranních hodinách je zatížení činným výkonem nízké a postupně v pracovní době (cca 7:00 – 15:00 hod.) dochází ke zvýšení, maxima nastávají okolo 12:00 hod., v odpoledních a večerních hodinách pak činný výkon na transformátorech klesá. Jalový výkon souvisí s činným výkonem. V dobách zatížení sítě nastává dodávka na obou transformátorech, s poklesem zatížení ve večerních a ranních hodinách dochází vlivem nabíjecího výkonu kabelového vedení k dodávce (přetoku) jalového výkonu na obou transformátorech do sítě 110 kV.



Obr. 7-9 Průběh činného a jalového výkonu na jednotlivých TR rozvodny BNO v zimním zatížení

Na Obr. 7-10 je zobrazen vývoj činného a jalového výkonu v rozvodně BNO v letním období. Zobrazeny jsou 3 dny 4. 7. 2017 (úterý) až 6. 7. 2017 (čtvrtek). Úterý 4. 7. je pracovní den a dny 5. 7. a 6. 7. jsou státním svátkem. Vývoj činného a jalového výkonu je obdobný jako na Obr. 7-9, v polední hodiny nastává nejvyšší zatížení činným výkonem, v ranních a večerních hodinách klesá.

Ve dnech státního svátku jsou patrné celkově nižší hodnoty činného výkonu na obou transformátorech oproti pracovnímu dni. Ve dnech státního svátku je zatížení činným výkonem nižší, než v pracovní dny, což ovlivňuje vývoj jalového výkonu v tyto dny. Je patrné, že ve sváteční dny téměř většinu času dochází k dodávce jalového výkonu do sítě 110 kV. K odběru ve čtvrtek 6. 7. 2017 na T102 dochází pouze mezi 15:00 až 20:00 hod., v pracovní den 4. 7. 2017 přitom docházelo k odběru na T102 mezi 9:15 až 18:30 hod.



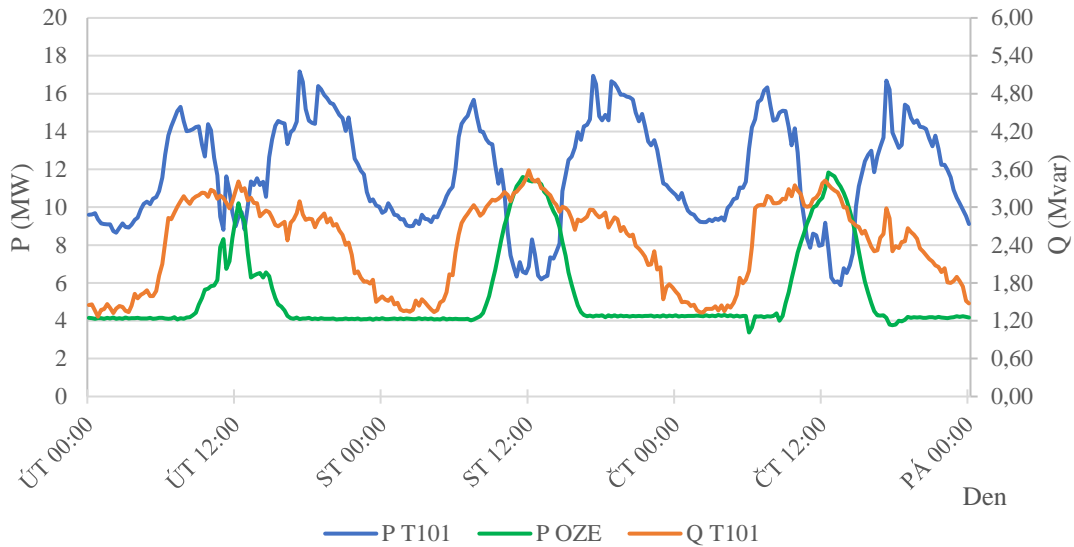
Obr. 7-10. Průběh činného a jalového výkonu na jednotlivých TR rozvodny BNO v letním zatížení

V oblasti 2 byla analyzována rozvodna Hustopeče (HU). V rozvodně jsou instalovány 2 transformátory 110/22 kV každý o výkonu 25 MVA. Transformátory jsou označeny T101 a T102, v provozu je vždy jeden transformátor T101 a druhý T102 je záložní. V oblasti rozvodny jsou k síti 22 kV připojeny tři typy OZE, a to FVE, BPE a VE dohromady o celkovém instalovaném výkonu 20,5 MW.

Činný výkon na transformátoru T101 je označený  $P_{T101}$ . Jalový výkon  $Q$  je dle transformátoru, označen  $Q_{T101}$ . Transformátor T102 nebyl ve sledovaném období v provozu, z toho důvodu není grafech uveden. Činný výkon dodaný do sítě z OZE je označený  $P_{OZE}$ .

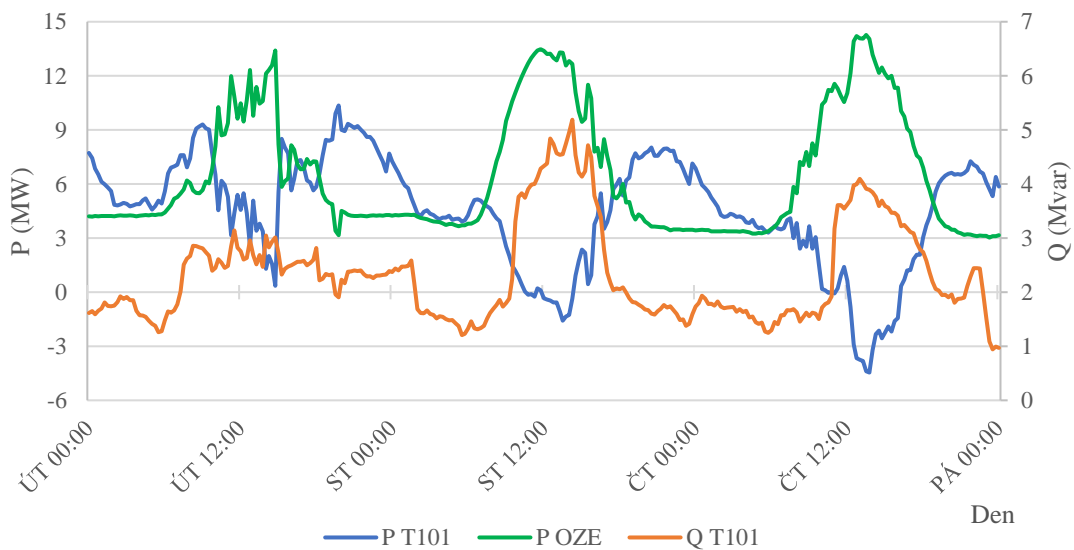
Na Obr. 7-11 je zobrazen vývoj činného a jalového výkonu v rozvodně HU doplněný o činný výkon z OZE, pro zimní zatížení. Zobrazeny jsou 3 pracovní dny 17. 1. 2017 (úterý) až 19. 1. 2017 (čtvrtek). Vývoj činného a jalového výkonu v rámci dnů je odlišný od rozvodny BNO z důvodu připojených OZE do DS 22 kV. Pokud by byly výkony  $P_{T01}$  a  $P_{OZE}$  sečteny, byly by vývoje obdobné. V ranních hodinách je zatížení sítě činným výkonem nízké, s pracovní dobou dochází k nárůstu a denního maxima bývá dosahováno okolo 12:00 hod. V odpoledních a večerních hodinách zatížení činným výkonem sítě klesá. V oblasti rozvodny HU jsou k síti připojeny říditelné (BPE, VE) a neříditelné (FVE), které ovlivňují vývoj činného výkonu na transformátoru. Paradoxně v době mezi 9 až 16 hod. dochází k nejmenšímu zatížení činným výkonem  $P_{T101}$  transformátoru. Způsobeno je to zvýšenou výrobou OZE v oblasti, které svým dodávaným výkonem  $P_{OZE}$  přispívají k pokrytí poptávky.

Z Obr. 7-11 je vidět, že říditelné OZE dodávají do sítě 22 kV ve sledovaném období téměř konstantně  $P_{OZE} = 4$  MW, ale v době cca mezi 9:00 až 16:00 hod. hodnota  $P_{OZE}$  narůstá, denního maxima dosahuje kolem 12:00 hod. a pak postupně klesá zpět na konstantní hodnotu. Nárůst je způsoben především výrobou FVE a také plánovanou výrobou z dalších říditelných zdrojů.



Obr. 7-11. Průběh činného a jalového výkonu na TR rozvodny HU v zimním zatížení

Na Obr. 7-12 je zobrazen vývoj činného a jalového výkonu v rozvodně HU v letním období. Zobrazeny jsou opět 3 dny 4. 7. 2017 (úterý) až 6. 7. 2017 (čtvrtek). Úterý 4. 7. je pracovní den a dny 5. a 6. 7. jsou státním svátkem. Vývoj činného a jalového výkonu na T101 je obdobný jako na Obr. 7-11, v tomto období se oproti zimnímu období více projevuje výroba FVE v poledních a odpoledních hodinách. Z průběhu  $P_{OZE}$  je zřetelné, že výroba z FVE silně závisí na aktuálním počasí (svítí/nesvítí slunce). Výkon z OZE dodávaný ve dne silně kolísá, v závislosti na slunečním svitu. Ve sváteční dny (středa, čtvrtek) je dokonce výroba z OZE větší než spotřeba. Na transformátoru nastala v úterý mezi 11:15 až 12:15 hod. a ve čtvrtek mezi 12:15 až 16:15 hod. dodávka (přetok) činného výkonu do sítě 110 kV. Jalový výkon není přetokem činného výkonu ovlivněn, v dobách zatížení sítě (poledne) nabývá odběr nejvyšších denních hodnot. S klesajícím zatížením činným výkonem klesá i hodnota odběru jalového výkonu.



Obr. 7-12. Průběh činného a jalového výkonu na TR rozvodny HU v letním zatížení

## 8 ZÁVĚR

Úvod bakalářské práce se zabývá rozbořem vlivu jalového výkonu na provoz elektrizační soustavy. Uvedeny jsou významné prvky ES, které výrazně ovlivňují velikost jalového výkonu. Zmíněny jsou například venkovní a kabelová vedení, která mají i dle provedené analýzy rozdílný vliv na vývoj jalového výkonu. Shrnuty jsou vlivy odběru s účíníkem menším než  $\cos(\varphi) = 0,95$  a také případy, kdy dochází ke změně toku jalového výkonu vlivem překompenzování, nebo při významném projevu nabíjecího výkonu vedení.

Energetika prochází přeměnou z centralizované výroby na decentralizovanou. I nadále se předpokládá rozvoj DECE na úkor velkých systémových elektráren. Tento rozvoj bude mít vliv na provoz sítí všech napěťových hladin. V kapitole 4 je vypracován přehled všech zdrojů instalovaných do hladiny 22 kV ve vybraných oblastech. V oblasti 1 jsou instalovány především velké tepelné elektrárny. V oblasti 2 jsou instalovány nejvíce FVE. Také jsou popsány aktuální možnosti dálkového řízení DECE v sítích E.ON a principy funkce automatické regulace účíníku a napětí, která zajišťuje stabilizaci napětí v místě připojení výroby.

Dále byl zpracován základní popis hromadné regulace jalového výkonu DECE. U které se uvažuje přidání do DŘS v roce 2020. Především za účelem kompenzace přebytků jalového výkonu v DS a v předávacím místě DS s PS. Možnost regulace jalového výkonu v předávacím místě DS s PS byla společností E.ON experimentálně ověřena. Výsledky provedené zkoušky jsou zpracovány v kapitole 6. Prokazují problematiku individuální regulaci jalového výkonu, kdy zregulování všech vybraných zdrojů trvalo přibližně 1 hodinu. Během zkoušky v žádném z měřených bodů sítě nedošlo k podpětí a také bylo ověřeno, že regulací účíníku DECE při instalovaném výkonu 130 MW lze v DS (při zapojení v době zkoušky) dosáhnout hodnoty odběru v předávacím místě DS s PS až 40 Mvar.

Dále byla zpracována analýza na úrovni rozvodu 110/22 kV. Analyzovány byly dvě oblasti. Oblast 1 je distribuční síť města Brna s charakteristickým kabelovým vedením na napěťových hladinách 22 kV a 0,4 kV, napěťová hladina 110 kV je realizována především venkovním vedením, ale částečně je použito i kabelové vedení. Oblast 2 odpovídá spíše venkovským lokalitám, distribuční síť je na všech napěťových hladinách realizována převážně venkovním vedením.

Analýza vývoje toku činné a jalové energie je provedena za období roků 2011 až 2017. Na začátku sledovaného období 2011 se obě analyzované oblasti z ročního sumárního pohledu jeví jako síť charakteristické odběrem jalové energie. V oblasti 1 je od začátku sledovaného období patrná postupná proměna charakteru toku jalové energie. Mezi roky 2011 až 2013 postupně klesá celkový odběr jalové energie ze sítě 110 kV a narůstá dodávka do sítě 110 kV, od roku 2014 převažuje dodávka jalové energie do soustavy 110 kV. Největší vliv na daný vývoj má zřejmě především postupné rozšiřování kabelového vedení 22 kV. Na celkové bilanci jalové energie se podílejí i tepelné elektrárny. Provozovány jsou v chladných měsících a společně s činnou energií dodávají do sítě i jalovou energii. V letních měsících dochází k odstavení těchto zdrojů. V Oblasti 2 po celé sledované období 2011 až 2017 převažuje odběr jalové energie ze sítě 110 kV. Rozsáhlé venkovní vedení při nízkém zatížení nepřispívá k přetokům tak významně jako kabelové vedení. Dalším významným faktorem ovlivňujícím jalovou energii v této oblasti, je automatická regulace  $U/Q$  vysokého počtu DECE. Při vypracovávání analýzy vývoje toku činné a jalové energie byl předpoklad, že dodávky jalové energie v oblasti 1 do sítě 110 kV nastávají zpravidla ve večerních hodinách a v nepracovní dny. V oblasti 2 je instalován vysoký počet DECE, především FVE, které v polední hodiny mohou způsobovat i přetok činné energie do sítě 110 kV. Za účelem detailnějšího

---

pohledu a prokázání uvažovaných předpokladů byla zpracována analýza průběhu činného a jalového výkonu.

V analýze činného a jalového výkonu jsou zobrazeny průběhy činného a jalového výkonu v rámci zimního a letního zatížení. V oblasti 1 byla analyzována rozvodna Brno-Opuštěná s instalovaným výkonem 2 x 40 MVA. Rozvodna je i na úrovni 110 kV napájena pouze kabelovým vedením, k její síti 22 kV není připojen žádný decentralizovaný zdroj. V oblasti 2 byla analyzována rozvodna Hustopeče s instalovaným výkonem 2 x 25 MVA, k jejíž napájené síti 22 kV jsou připojeny OZE. Provedením analýzy bylo zjištěno, že k přetokům jalového výkonu do sítě 110 kV dochází v rozvodně Brno-Opuštěná ve večerních až ranních hodinách. V rozvodně Hustopeče nedošlo během sledovaných dnů k žádnému přetoku jalového výkonu, vlivem OZE připojených k síti 22 kV docházelo v letní dny během poledních hodin k přetoku činného výkonu do sítě 110 kV.

Na základě analýz pro oblast 1 bude vhodné z hlediska přetoků z DS do PS využívat hromadnou regulaci jalového výkonu ve večerních až ranních hodinách především v zimních obdobích, kdy jsou v provozu velké tepelné elektrárny, pro které je také uvažována hromadná regulace  $Q$ . V oblasti 2 již byla i provedenou zkouškou ověřena vhodnost hromadné regulace  $Q$ . Ze skladby decentrálních zdrojů, které jsou závislé především na podnebných podmínkách bude využití hromadné regulace  $Q$  především v nepracovní dny mezi ranními a odpoledními hodinami.

## POUŽITÁ LITERATURA

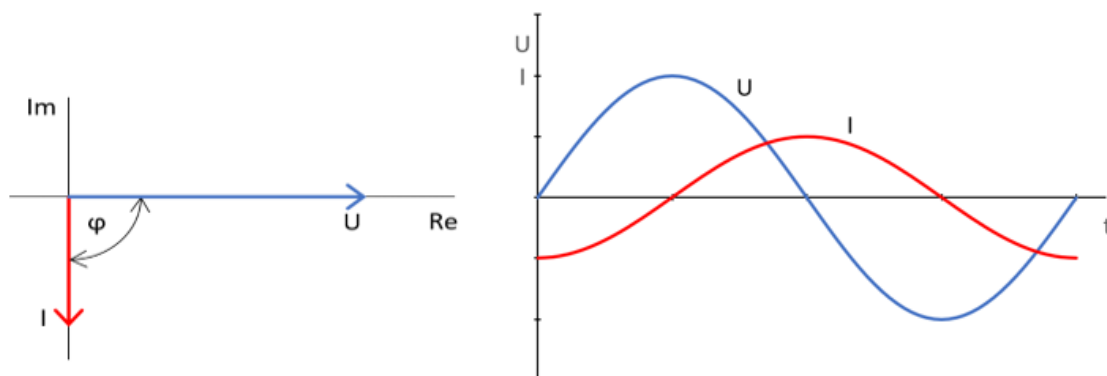
- [1] VANĚK, R. *REGULACE U/Q OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ V SÍTI VN ČEZ DISTRIBUCE*, A. S., Energetika: odborný časopis pro elektrárství, teplárství a užití energie, 2018, ROČ. 68, č. 5, s. 313-317. ISSN: 0375-8842
- [2] HONIŠ, René. *Přenosová soustava České republiky*. [Ostrava: Moravskoslezský energetický klastr, 2013]. ISBN 978-80-905392-3-5.
- [3] ČEPS a. s. *ENTSO-E* [online]. [cit. 2018-11-07]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/entso-e>
- [4] ENTSO-E. *Who Is ENTSO-E?* [online]. c2009-2018 [cit. 2018-11-07]. Dostupné z: <https://www.entsoe.eu/about/inside-entsoe/objectives/>
- [5] Eduard Majling. *Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny (ENTSO-E)* [online]. 2015 [cit. 2018-07-11]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/evropska-sit-provozovatelu-prenosovych-soustav-elektřiny-entso-e/>
- [6] KUBÍN, Miroslav. *Přenosy elektrické energie ČR v kontextu evropského vývoje*. Praha: ČEPS, 2004.
- [7] ČEPS a. s. *Údaje o PS* [online]. [cit. 2018-11-16]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/udaje-o-ps>
- [8] E.ON Distribuce a. s. *Technické informace o distribuční soustavě elektřiny* [online]. c2018 [cit. 2018-11-08]. Dostupné z: <https://www.eon-distribuce.cz/technicke-informace-o-distribucni-soustave-elektřiny>
- [9] Vítězslav Pankrác. *Často používané aplikace tlumivek v silnoproudé elektrotechnice* [online]. 18.02.2010 [cit. 2018-8-24]. Dostupné z: <http://elektrorevue.cz/cz/clanky/teoreticka-elektrotechnika/0/casto-pouzivane-aplikace-tlumivek-v-silnoproude-elektrotechnice/>
- [10] HNILICA, František. *Účinník v energetice*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960. Elektrotechnická minima.
- [11] HALUZÍK, Evžen. *Řízení provozu elektrizačních soustav*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1987. Učební texty vysokých škol.
- [12] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [13] E.ON Distribuce a.s., F. A. Gerstnera 2151/6, 370 01 České Budějovice. Interní systém. 2017.
- [14] TLUSTÝ, Josef. *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.
- [15] ČEZ, a. s. *Energie z obnovitelných zdrojů* [online]. c2019 [cit. 2019-01-5]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/obnovitelne-zdroje.html>
- [16] Bioplynové stanice. *Technologie bioplynových stanic* [online]. c2008 [cit. 2019-1-5]. Dostupné z: <http://www.bioplynovestanice.cz/technologie-bps/>
- [17] Jan Budín. *Kogenerace - princip, technologie a výhody* [online]. 21. duben 2015, [cit. 2019-1-5]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/technologie/kogenerace-princip-technologie-a-vyhody>

- 
- [18] SAKO Brno a. s. *Energetické využití odpadu* [online]. c2018 [cit. 2019-1-13]. Dostupné z: <https://www.sako.cz/pro-brnaky/cz/801/energeticke-vyuziti-odpadu/>
- [19] Teplárny Brno, a.s. *PROVOZY* [online]. c2014-2016 [cit. 2019-1-13]. Dostupné z: <https://www.teplarny.cz/provozy>
- [20] TESAŘOVÁ, M., VYUKA, R. *Vyhodnocení výkonových toků v sítích vn a na rozhraní napěťových hladin vvn/vn*. Energetika: odborný časopis pro elektrárství, teplárství a užití energie, 2017, roč. 67, č. 5, s. 313-317. ISSN: 0375-8842
- [21] JIŘIČKA, J., KAŠPÍREK, M., TESAŘOVÁ, M. *Analýza toků jalových výkonů mezi přenosovou a distribuční soustavou s dílčím rozbořem sítě 110 kV*. Energetika: odborný časopis pro elektrárství, teplárství a užití energie, 2017, roč. 67, č. 4, s. 251-255. ISSN: 0375-8842

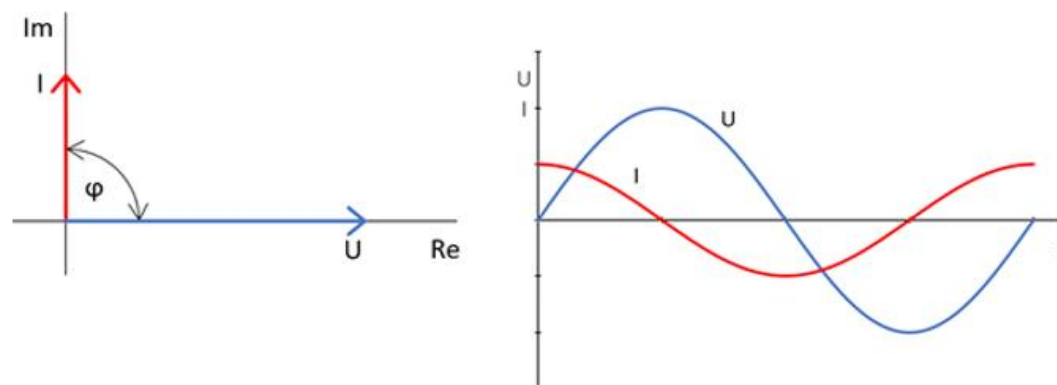


## **SEZNAM PŘÍLOH**

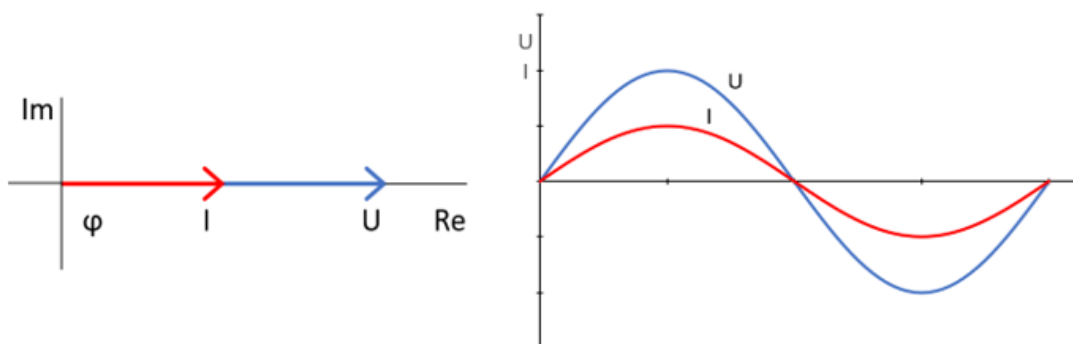
<b>PŘÍLOHA A: FÁZOROVÉ DIAGRAMY A OKAMŽITÉ PRŮBĚHY NAPĚTÍ A PROUDU.....</b>	<b>57</b>
<b>PŘÍLOHA B: ODVOZENÍ FERRANTIHO JEVU .....</b>	<b>58</b>
<b>PŘÍLOHA C: JMENOVITÉ HODNOTY A KRUHOVÉ DIAGRAMY GENERÁTORŮ .....</b>	<b>59</b>

**Příloha A: Fázorové diagramy a okamžité průběhy napětí a proudu**

Obr. A-1 Fázorový diagram a okamžitý průběh napětí, proudu indukčního charakteru [1]



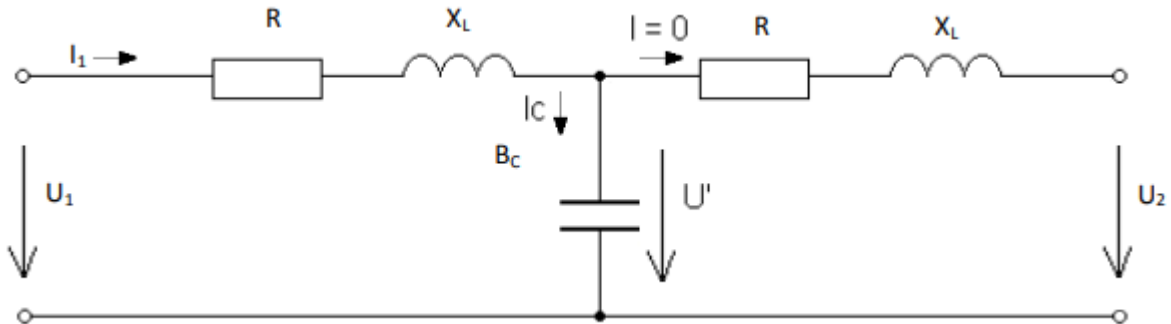
Obr. A-2 Fázorový diagram a okamžitý průběh napětí a proudu kapacitního charakteru [1]



Obr. A-3 Fázorový diagram a okamžitý průběh napětí a proudu [1]

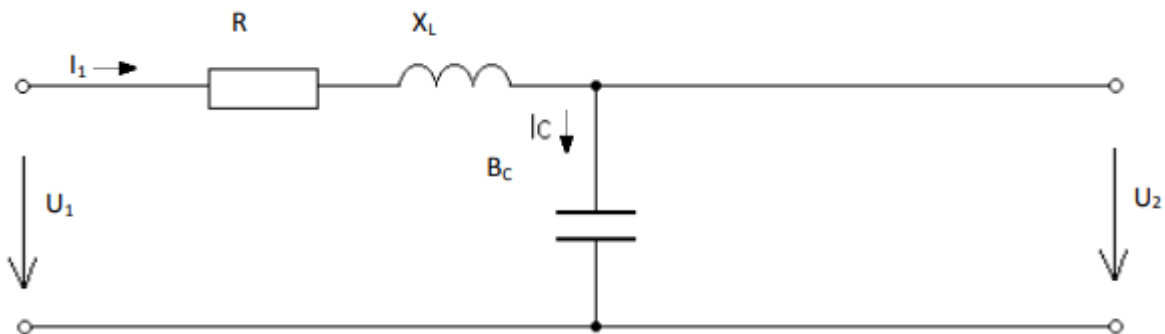
## Příloha B: Odvození Ferrantiho jevu

Při odvození Ferrantiho jevu vycházíme například z T-článku, který je na *Obr. B-4*. Na konci uvažujeme nulový odběr  $I_2 = 0$  A. Pravou stranu podélně větve lze zanedbat.



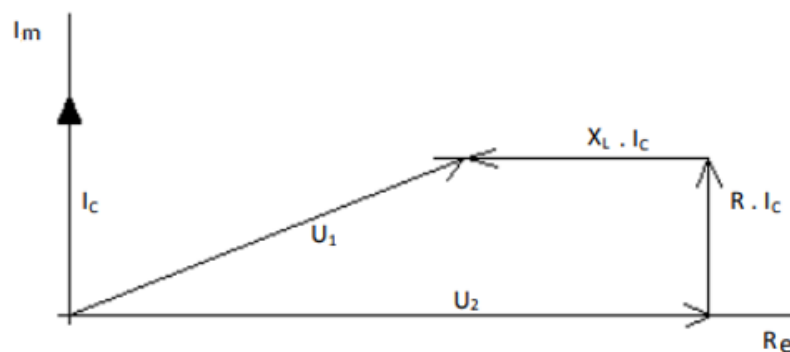
*Obr. B-4 Zjednodušené schéma T článku*

Činnou složku příčné admitance také zanedbáváme, při chodu naprázdno protéká příčnou a podélnou větví kapacitní proud  $I_C$ , platí  $I_C = I_1$ . Náhradní schéma nyní uvažujeme na *Obr. B-5*.



*Obr. B-5 Zjednodušené schéma T-článku se zanedbanou podélnou větví*

Fázorový diagram zjednodušeného schématu je uveden na *Obr. B-6*. Je vidět, že napětí na konci vedení je větší než na začátku.



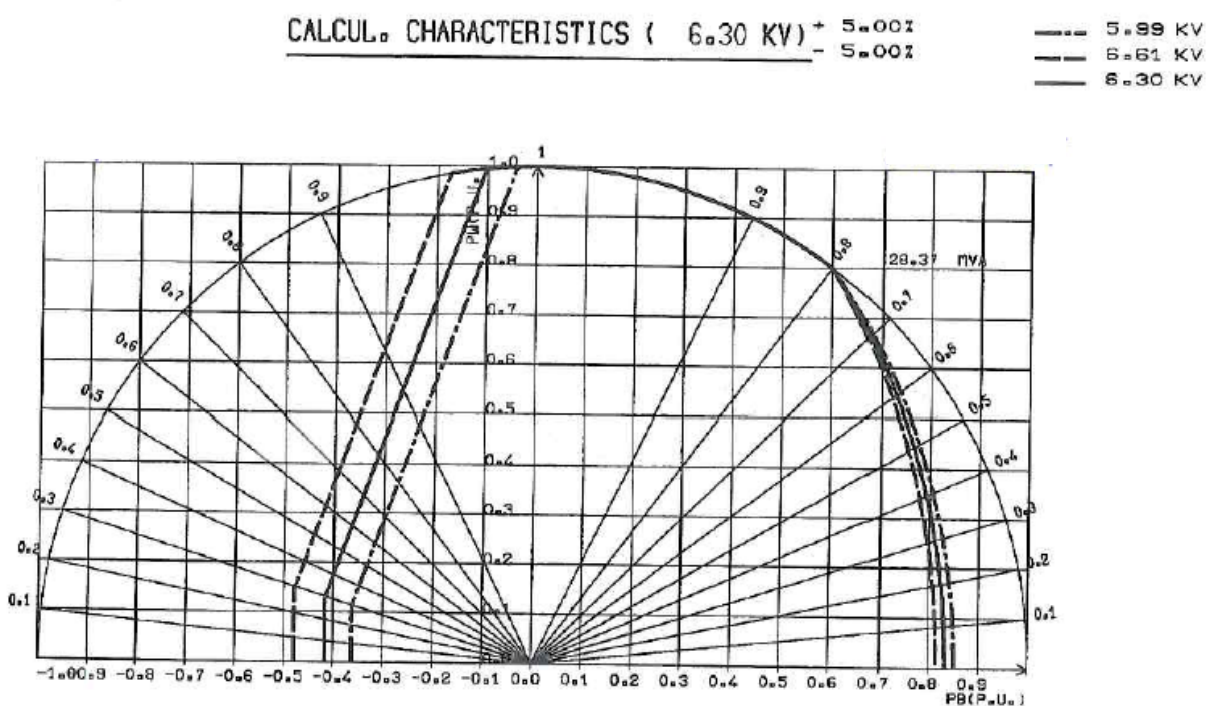
*Obr. B-6 Fázový diagram*

## Příloha C: Jmenovité hodnoty a kruhové diagramy generátorů

Synchronní generátor HTM-110z04 instalovaný ve Spalovně odpadu SAKO Brno a. s.

Jmenovité hodnoty synchronního generátoru HTM-110z04 [13]:

- Výkon  $P_i = 22700$  kW,  $S = 28\,375$  kVA
- Napětí  $U = 6,3$  kV tol.  $+ 5 / - 5$  %
- Proud  $I = 2600$  A
- Frekvence  $f = 50$  Hz
- Účinitík  $\cos(\varphi) = 0,8$
- Otáčky  $n = 1500$  ot/min

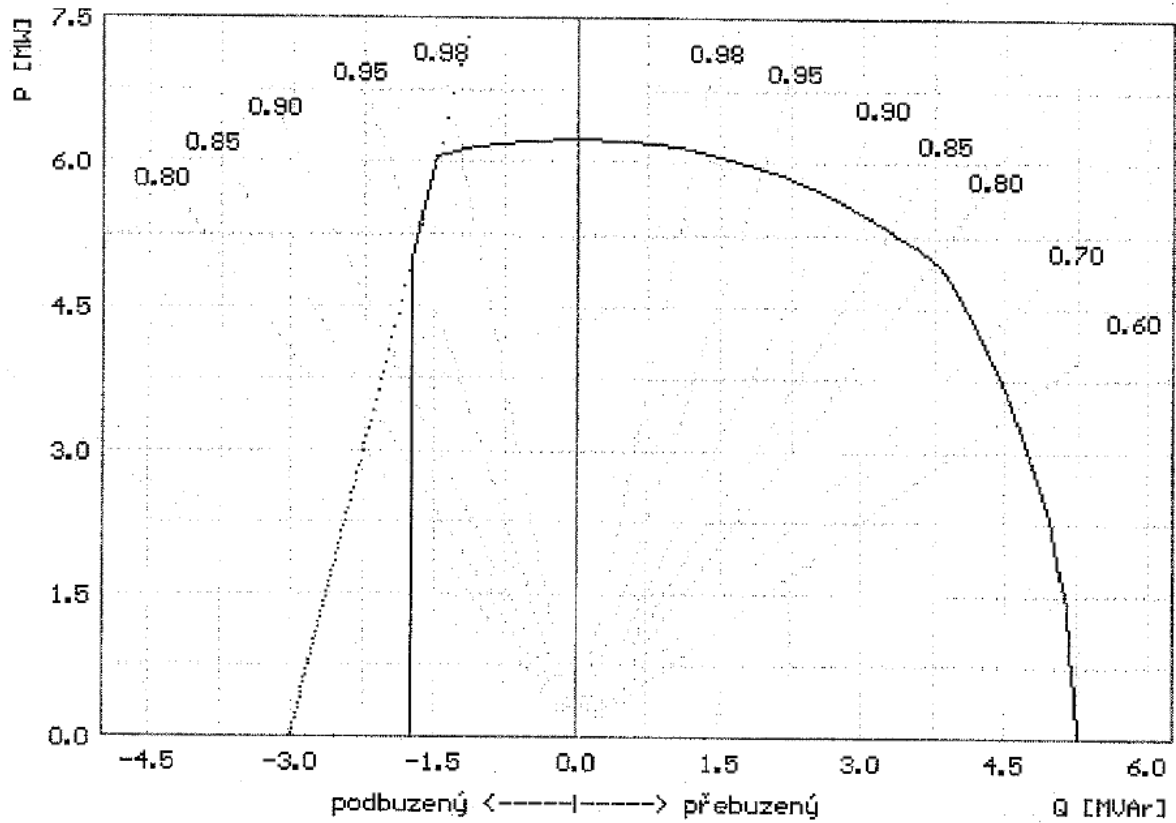


Obr. C-7 P, Q diagram generátoru HTM-110z04 [13]

Vybraný synchronní generátor Škoda TG 20, typ: 8H 540650/2 instalovaný v teplárně Špitálka.

Jmenovité hodnoty synchronního generátoru Škoda TG 20 [13]:

- Výkon  $P_i = 5000$  kW,  $S = 6250$  kVA
- Napětí  $U = 6,3$  kV
- Proud  $I = 573$  A
- Frekvence  $f = 50$  Hz
- Účinitík  $\cos(\varphi) = 0,8$

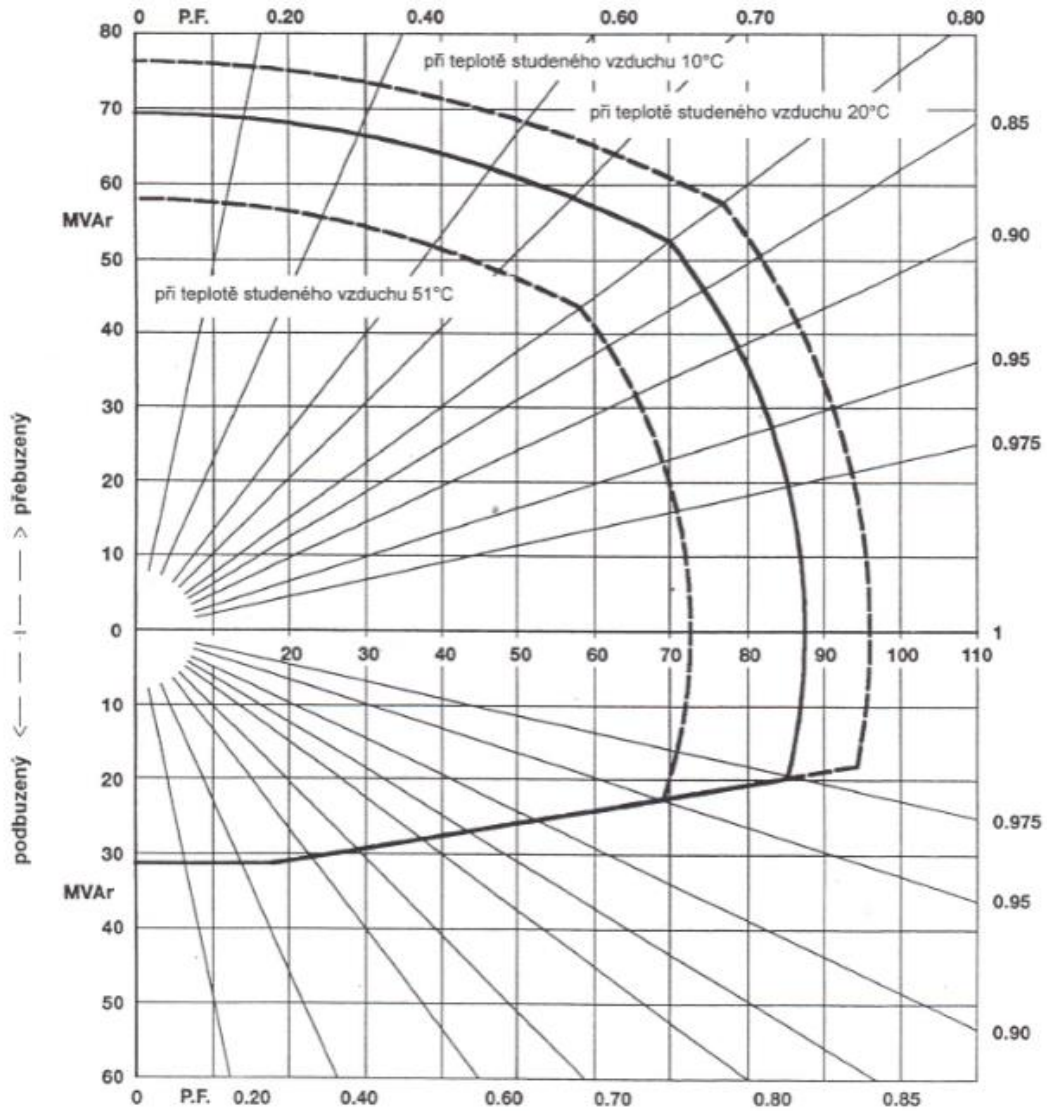


Obr. C-8.  $P, Q$  diagram generátoru Škoda TG 20 [13]

Vybraný synchronní generátor TLRI 86/29, typ: 8H 540650/2 instalovaný v teplárně Červený Mlýn.

Typ generátoru: TLRI 86 / 29

Jmenovitý zdánlivý výkon	$S_N$	=	87,500 MVA	Jmenovitá frekvence	$f_N$	=	50,0 Hz
Jmenovité napětí	$U_N$	=	10,500 kV	Účinnost	$\cos \varphi$	=	0,8
Jmenovitý proud	$I_N$	=	4,811 kA	Teplota studeného vzduchu	$t_K$	=	20,0 °C



Obr. C-9. P, Q diagram generátoru TLRI 86/29 [13]