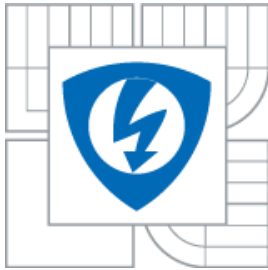




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## PROVOZ DISTRIBUČNÍ SÍTĚ 110 KV S VELKÝM ZASTOUPENÍM OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ

THE OPERATION OF DISTRIBUTION GRID 110 KV WITH HIGH PENETRATION OF RENEWABLE  
SOURCES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

PETR MODLITBA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR TOMAN, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Petr Modlitba

**ID:** 146906

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Provoz distribuční sítě 110 kV s velkým zastoupením obnovitelných zdrojů**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Způsob simulace a výpočtu střídavého chodu sítě vvn.
2. Sestavení simulačního modelu pro výpočet distribuční sítě 110 kV.
3. Podmínky pro připojení OZE do sítí.
4. Aktuální stav OZE v distribučních sítích E.ON Distribuce a způsob jejich provozu.
5. Analýza provozu sítě 110 kV s připojenými OZE (změřené hodnoty a výpočty).
6. Vliv proměnné dodávky z OZE na provoz sítí a možnosti jejich řízení.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 28.5.2015

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

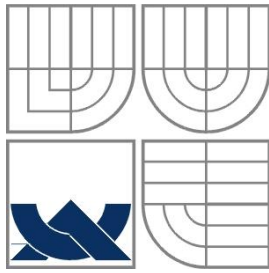
MODLITBA, P. Provoz distribuční sítě 110 kV s velkým zastoupením obnovitelných zdrojů. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2015, 47 stran.

Poděkování:

Chci touto cestou poděkovat vedoucímu mé práce panu doc. Ing. Petru Tomanovi, Ph.D. za odbornou pomoc a podporu a kolektivu pracovníků útvaru rozvoje E.ON Distribuce za poskytnutí podkladů a odbornou konzultaci při vypracování této bakalářské 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.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky**

**Bakalářská práce**

**Provoz distribuční sítě 110 kV  
s velkým zastoupením obnovitelných  
zdrojů**

**Petr Modlitba**

**vedoucí: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2015**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

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

**Semester's Thesis**

**The operation of distribution grid  
110 kV with high penetration of  
renewable sources**

by

**Petr Modlitba**

**Supervisor: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

**Brno University of Technology, 2015**

**Brno**

**ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá problematikou připojování zdrojů rozptýlené výroby do distribuční sítě. V první části práce je popsána metodika výpočtu ustáleného chodu střídavé sítě. Druhá část se věnuje podmínkám připojování zdrojů rozptýlené výroby do distribuční sítě. Ve třetí části je popsána charakteristika zdrojů a sítě 110 kV v uzlové oblasti napájené z transformace 220/110 kV Sokolnice. Na základě zpracovaného simulačního modelu byly provedeny výpočty ustáleného chodu sítě 110 kV uzlové oblasti Sokolnice pomocí výpočetního programu pro analýzu a výpočet elektrických sítí LUG. Cílem bylo ověřit elektrické poměry v síti 110 kV při provozu decentrálních zdrojů. Podle podmínek a pravidel pro připojování zdrojů do sítě 110 kV byly vyhodnoceny možnosti dalšího připojování nových zdrojů do distribuční sítě 110 kV.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Zdroje rozptýlené výroby; distribuční síť; ustálený chod sítě; podmínky připojitelnosti zdrojů;

**ABSTRACT**

This work deals with the connection of distributed generation into the distribution grid. The first part describes the methodology for calculating the steady state of alternating current network. The second part deals with the conditions of connecting distributed generation into the grid. The third part describes the types of power sources and distribution system 110 kV in the area supplied from the transformation 220/110 kV Sokolnice. On the basis of the simulation model there were performed calculations of 110 kV network steady-state operation in the nodal area Sokolnice to verify the electrical network conditions during operation of distributed generation. There were also evaluated possibilities for an increase in installed capacity of distributed sources.

**KEY WORDS:**

Distributed power sources, distribution grid; steady state operation of the network; connection of power sources;

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>11</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>12</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>13</b>
<b>2 USTÁLENÝ CHOD STRÍDAVÉ SÍTĚ 110 KV.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 NÁHRADNÍ SCHÉMA VEDENÍ.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 STRÍDAVÝ CHOD ELEKTRICKÉ SÍTĚ.....</b>	<b>15</b>
2.2.1 VÝPOČET TOKŮ VÝKONŮ.....	16
2.2.2 ZNAMÉNKOVÁ KONVENCE.....	16
2.2.3 PODMÍNKY URČITOSTI CHODU SÍTĚ .....	17
<b>2.3 ITERAČNÍ METODY PRO VÝPOČET USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ.....</b>	<b>18</b>
2.3.1 GAUSS-SEIDLOVA METODA .....	18
2.3.2 NEWTON-RAPHSONOVA ITERAČNÍ METODA.....	19
2.3.3 PŘÍKLAD VÝPOČTU CHODU SÍTĚ GAUSS-SEIDLOVOU ITERAČNÍ METODOU.....	19
<b>3 PODMÍNKY PRO PŘIPOJENÍ NOVÝCH ZDROJŮ DO SÍTĚ .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1 VSTUPNÍ PODKLADY PRO ZPRACOVÁNÍ STUDIE PŘIPOJITELNOSTI .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2 VÝPOČETNÍ ANALÝZY VLIVU PŘIPOJENÍ NOVÉHO ZDROJE DO SÍTĚ.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3 DOPORUČENÍ Z VÝSLEDKŮ SÍŤOVÝCH ANALÝZ PRO PŘIPOJENÍ NOVÉHO ZDROJE.....</b>	<b>24</b>
<b>3.4 OMEZENÍ PRO PŘIPOJOVÁNÍ NOVÝCH ZDROJŮ DO SÍTĚ.....</b>	<b>25</b>
3.4.1 LIMIT DODÁVKY VÝKONU Z OZE A ZPŮSOB PROVOZU SÍTĚ S VELKÝM ZASTOUPENÍM OZE..	25
3.4.2 REZERVOVANÝ VÝKON NA PŘEDACÍCH MÍSTECH PS/DS .....	25
3.4.3 MEZNÍ VÝKON PRO PŘIPOJENÍ ZDROJŮ DO DS .....	26
<b>4 ZDROJE A SÍTĚ 110 KV V UZLOVÉ OBLASTI SOKOLNICE A ZPŮSOB JEJICH ŘÍZENÍ..</b>	<b>28</b>
<b>4.1 OBNOVITELNÉ ZDROJE .....</b>	<b>28</b>
4.1.1 FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY .....	28
4.1.2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY .....	28
4.1.3 VODNÍ ELEKTRÁRNY.....	29
4.1.4 BIOPLYNOVÉ ELEKTRÁRNY .....	29
<b>4.2 ELEKTRÁRNA HODONÍN .....</b>	<b>29</b>
<b>4.3 OSTATNÍ ZDROJE.....</b>	<b>30</b>
<b>4.4 CELKOVÝ VÝKON DECENTRÁLNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>30</b>
<b>4.5 SOUDOBYST VÝROBY DECENTRÁLNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>30</b>
<b>4.6 SÍTĚ 110 KV V UZLOVÉ OBLASTI SOKOLNICE.....</b>	<b>31</b>
<b>4.7 DISPEČERSKÉ ŘÍZENÍ ZDROJŮ V SÍTI E.ON DISTRIBUCE .....</b>	<b>31</b>
4.7.1 REGULAČNÍ MOŽNOSTI FVE Z HLEDISKA DISPEČERSKÉHO ŘÍZENÍ .....	32
4.7.2 REGULAČNÍ MOŽNOSTI OSTATNÍCH ZDROJŮ ROZPTÝLENÉ VÝROBY Z HLEDISKA DISPEČERSKÉHO ŘÍZENÍ .....	32
4.7.3 REGULACE NAPĚTÍ ODBOČKAMI NA TRANSFORMÁTORECH .....	33
<b>5 SOFTWARE PRO ŘEŠENÍ USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ .....</b>	<b>33</b>

---

<b>5.1 PROGRAM LUG.....</b>	<b>33</b>
<b>5.2 PROGRAM E-VLIVY .....</b>	<b>33</b>
<b>5.3 PROGRAM MODES.....</b>	<b>34</b>
<b>5.4 PROGRAMY PAS DAISY OFF-LINE A BIZON PROJEKTANT .....</b>	<b>34</b>
<b>5.5 PROGRAM NETCALC .....</b>	<b>34</b>
<b>6 SESTAVENÍ MODELU PRO VÝPOČET CHODU SÍTĚ V PROGRAMU LUG .....</b>	<b>34</b>
<b>7 ANALYZOVANÉ PROVOZNÍ REŽIMY .....</b>	<b>37</b>
<b>7.1 ANALÝZA NAPĚŤOVÝCH POMĚRŮ PŘI MEZNÍCH STAVECH VÝROBY OZE .....</b>	<b>37</b>
<b>7.2 KONTROLA ZATÍŽENÍ VEDENÍ 110 kV PŘI MEZNÍCH STAVECH .....</b>	<b>40</b>
7.2.1 MEZNÍ PŘIPOJITELNÝ VÝKON ZDROJŮ Z HLEDISKA TRANSFORMACE PS/110 kV. ....	43
7.2.2 MEZNÍ PŘIPOJITELNÝ VÝKON ZDROJŮ Z HLEDISKA NAPĚŤOVÝCH POMĚRŮ V SÍTI 110 kV ....	43
7.2.3 MEZNÍ PŘIPOJITELNÝ VÝKON ZDROJŮ Z HLEDISKA TRANSFORMACE 110 kV/VN .....	45
<b>8 ZÁVĚR.....</b>	<b>45</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>47</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Náhrada vedení <math>\pi</math>-článkem</i> .....	14
<i>Obr. 2-2 Nahrazení vedení <math>\pi</math>-článkem k výpočtu ztrát</i> .....	16
<i>Obr. 2-3 Příklad elektrické sítě - zadání</i> .....	19
<i>Obr. 2-4 Příklad elektrické sítě - řešení</i> .....	22
<i>Obr. 3-1 Stanovení volného výkonu pro připojení nových zdrojů do jednotlivých hladin napětí DS</i> .....	27
<i>Obr. 4-1 Roční suma dopadajícího slunečního záření (<math>MJ/m^2</math>)[6]</i> .....	28
<i>Obr. 4-2 Větrná mapa ČR[14]</i> .....	29
<i>Obr. 4-2 Síť 110 kV v oblasti TR Sokolnice 220/110 kV [8]</i> .....	31
<i>Obr. 6-1 Síť 110 kV v oblasti TR Sokolnice 220/110 kV [8]</i> .....	36
<i>Obr. 7-1 Napětí v uzlech 110 kV v závislosti na dodávce z decentrálních zdrojů v UO Sokolnice v zimním období</i> .....	37
<i>Obr. 7-2 Napětí v uzlech 110 kV v závislosti na dodávce z decentrální zdrojů v letním období</i> ...	38
<i>Obr. 7-3 Změna napětí v uzlech 110 kV při změně dodávky výkonu zdrojů - souboré vypnutí všech zdrojů v oblasti Sokolnice z plného výkonu na nulový výkon v letním a zimním zatížení</i> .....	39
<i>Obr. 7-4 Procentní změna napětí při souboré změně dodávky výkonu všech zdrojů v oblasti z plného výkonu na nulový výkon v letním a zimním období</i> .....	39
<i>Obr. 7-5 Zatížení vedení 110 kV při úplném schématu zapojení a stavu N-1 pro letní zatížení při plném nasazení výroby z decentrálních zdrojů</i> .....	41
<i>Obr. 7-6 Zatížení vedení 110 kV při úplném schématu zapojení a při vypnutí vedení 517, 527 Sokolnice – Hrušovany u Brna/Pohořelice pro letní zatížení a plné nasazení decentrálních zdrojů</i> .....	41
<i>Obr. 7-7 Zatížení vedení 110 kV při úplném schématu zapojení a při vypnutí vedení 530, 531 Sokolnice – Hustopeče/Břeclav pro letní zatížení a plné nasazení decentrálních zdrojů</i> .....	42
<i>Obr. 7-8 Zatížení vedení 110 kV při úplném schématu zapojení a při vypnutí vedení 535, 536 Sokolnice – Hodonín pro letní zatížení a plné nasazení decentrálních zdrojů</i> .....	42

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 2-1 Znaménková konvence ve zdrojových a odběrových uzlech .....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 2-2 Příklad výpočtu napětí pomocí Gauss-Seidlovou iterační metodou.....</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 4-1 Instalovaný výkon jednotlivých typů zdrojů v oblasti TR Sokolnice 220/110 kV.....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 4-2 Soudobost výroby jednotlivých typů zdrojů v oblasti TR Sokolnice 220/110 kV.....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 6-1 Instalované výkony zdrojů a jejich dodávka se zahrnutím soudobosti v jednotlivých uzlech 110 kV v UO Sokolnice .....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 6-2 Odběry v jednotlivých uzlech 110 kV v UO Sokolnice v letním a zimním stavu zatížení. (současný stav dle měření) .....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 7-1 Maximální dovolená proudová zatížitelnost jednotlivých vedení 110 kV v analyzované oblasti Sokolnice a jalový výkon generovaný jednotlivými vedeními při chodu naprázdno. .</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 7-2 Aplikace vzorce pro výpočet mezního volného výkonu na transformaci 220/110 kV pro připojení nových zdrojů – současný stav s transformací 220/110 kV, 2x200 MVA a výpočet mezního výkonu pro budoucí stav s transformací 400/110 kV, 2x350 MVA.....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 7-3 Aplikace vzorce pro výpočet mezního volného výkonu na transformaci 110 kV/vn pro připojení nových zdrojů.....</i>	<i>45</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$B$	[S]	kapacitní susceptance
$C$	[F]	kapacita
$f$	[Hz]	frekvence
$f_s$	[-]	soudobost výroby
$G$	[S]	svodová vodivost
$I$	[A]	proud
$I_{max}$	[A]	maximální proud
$k_{TR}$	[-]	redukční koeficient
$L$	[H]	indukčnost
$P$	[W]	činný výkon
$P_{BILANCE}$	[MW]	bilance činných výkonů
$P_i$	[MVA]	instalovaný transformační výkon
$P_{inst}$	[MW]	instalovaný výkon
$P_{mez}$	[MW]	mezní připojitelný výkon
$Q$	[VAr]	jalový výkon
$R$	[ $\Omega$ ]	rezistance
$S$	[VA]	zdánlivý výkon
$U$	[V]	napětí
$X$	[ $\Omega$ ]	induktivní reaktance
$\delta$	[ $^\circ$ ]	úhel natočení fázoru napětí

DS	Distribuční síť
ES	Elektrizační soustava
FVE	Fotovoltaická elektrárna
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
MVE	Malá vodní elektrárna
NN	Nízké napětí
NZ	Napájecí zdroj
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
PS	Přenosová síť
TR	Transformovna
UO	Uzlová oblast
VN	Vysoké napětí
VTE	Větrná elektrárna
VVN	Velmi vysoké napětí

# 1 ÚVOD

Rozvoj obnovitelných zdrojů energie významným způsobem ovlivňuje provoz a rozvoj elektrizační soustavy České republiky. V rámci Evropské unie byla vydána směrnice, která zavazuje členské státy k navýšení podílu výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů na celkové výrobě elektřiny. Česká republika se při vstupu do EU zavázala ke splnění 8% podílu výroby elektřiny v OZE do roku 2010. Proto parlament ČR podpořil výrobu elektřiny z OZE přidělením dotací a zajištěním přednostního výkupu elektřiny z těchto zdrojů. To vedlo k velkému rozvoji připojování FVE do elektrizační soustavy. Tímto sice došlo ke splnění požadavků EU na podíl výroby elektřiny z OZE v ČR, avšak připojování velkého množství fotovoltaických elektráren vedlo k problémům s provozem v dotčených částech elektrických sítí a také k problémům s regulací výroby v celé elektrizační soustavě ČR. Z důvodů zajištění spolehlivosti provozu soustavy a požadovaných technických parametrů bylo přistoupeno k omezení připojení nových zdrojů FVE a VTE v jednotlivých částech distribučních sítí na úrovni napěťových hladin VN a VVN. S ohledem na zachování provozovatelnosti ES ČR byl ze strany provozovatele přenosové sítě a provozovatelů distribučních sítí v únoru 2010 vyhlášen tzv. STOP STAV, který zastavil připojování dalších zdrojů rozptýlené výroby do distribučních sítí. Po získání a ověření zkušeností s provozem ES s velkým zastoupením zdrojů s kolísavou dodávkou výkonu bylo postupně povolováno připojení jednotlivých typů decentralních zdrojů do sítí.

V současnosti se připravuje novela energetického zákona (nyní Zákon č.458/2000 Sb. [3]), podle kterého bude možno zjednodušeným způsobem (pouze na oznámení) připojovat malé zdroje do instalovaného výkonu 10 kW.

Po omezení neúměrně vysoké finanční podpory při výkupu elektřiny z FVE je nyní opět možné připojovat další zdroje do sítí. Připojení každého nového zdroje do PS a do sítě 110 kV je podmíněno zpracováním studie připojitelnosti, která dokladuje technické podmínky a vlivy nového zdroje na síť v lokalitě, do které má být nový zdroj připojen.

Jednou z oblastí sítí 110 kV s velkým zastoupením zdrojů rozptýlené výroby, především FVE, je oblast jižní Moravy. Vzhledem k tomu, že oblast sítě 110 kV napájená z transformace 220/110 kV Sokolnice již obsahuje značné množství rozptýlených výroben, především FVE, vyžaduje provozovatel distribuční sítě E.ON Distribuce pro připojení dalších zdrojů v této oblasti zpracování studie připojitelnosti pro jednotlivé nově připojované zdroje i do sítí VN. Dalším zájmem provozovatele DS E.ON Distribuce je stanovit, jaké množství nových zdrojů rozptýlené výroby, lze do této oblasti ještě připojit tak, aby nedošlo ke snížení spolehlivosti provozu sítí a byly dodrženy požadované technické provozní parametry.

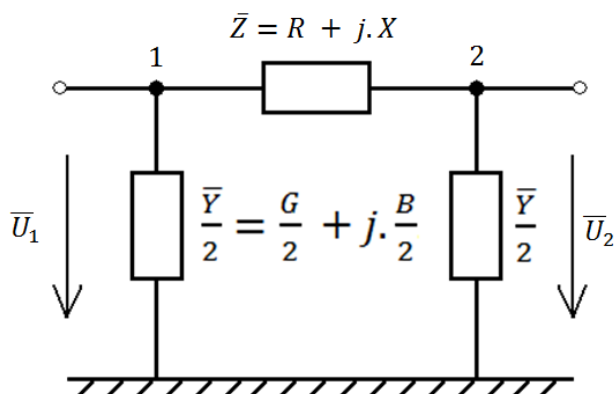
Cílem bakalářské práce je analyzovat vliv připojení velkého množství zdrojů rozptýlené výroby na provozní poměry v distribuční síti 110 kV v oblasti napájené z transformace 220/110 kV Sokolnice. Dalším cílem práce je stanovit množství a velikost zdrojů, které je možné do této oblasti ještě připojit tak, aby byly dodrženy požadované elektrické a přenosové poměry v distribuční síti 110 kV a na transformaci PS/110 kV a 110 kV/vn a nebyla ohrožena spolehlivost provozu elektrické sítě v této části ES. Přitom bude zohledněna možnost a stanoven vliv regulace výkonu dodávaného z OZE podle požadavků dispečerského řízení v oblasti napájené z TR 220/110 kV Sokolnice.

## 2 USTÁLENÝ CHOD STŘÍDAVÉ SÍTĚ 110 kV

Připojitelnost nových zdrojů do sítě se prověřuje řadou simulačních výpočtů a analýz, které ukazují vliv připojovaného nového zdroje na elektrické poměry v příslušné síti. Jedním ze základních typů síťových výpočtů je kontrola elektrických poměrů chodu sítě, tj. analýza rozdělování toků činných a jalových výkonů v síti a stanovení napěťových poměrů při připojení nového zdroje do sítě. Rozdělování toku výkonu po jednotlivých prvcích (vedeních a transformátorech) sítě a napětí v uzlech je výsledkem výpočtu ustáleného chodu střídavé sítě. Řešení ustáleného chodu se současně doplňuje kontrolou, zda některý přenosový prvek není přetížen. Výpočet se provádí zejména pro charakteristické bilanční stavy sítě - maximální a minimální zatížení sítě a pro mezní provozní stavy připojovaných zdrojů v charakteristických provozních režimech zapojení sítě. Odběry a dodávky výkonu jsou zadávány činnými a jalovými složkami výkonu v uzlech sítě. To má za následek, že chod sítě není možné popsat soustavou lineárních rovnic. Matematická formulace výpočtu ustáleného chodu sítě vede k soustavě nelineárních rovnic, pro jejichž řešení se používají iterační metody. Výpočet iteračními metodami bývá u rozsáhlých sítí časově náročný a také nemusí vést k vyřešení úlohy v důsledku špatné konvergence nebo dokonce nekonvergence iteračních kroků. Pro některé výpočty ustáleného chodu, kde není nutná velká přesnost, se úloha linearizuje. Jsou to např. výpočty pro dlouhodobé plánování rozvoje ES nebo výpočty spolehlivosti. Výkony zadané v jednotlivých uzlech se převedou na proudy a to podělením střední hodnotou očekávaného napětí v uzlech sítě anebo napětím jmenovitým. [1]

### 2.1 Náhradní schéma vedení

Při řešení ustálených stavů v soustavách se střídavým proudem o frekvenci 50 Hz se zavádí náhradní parametry pro simulaci vedení. Přitom se vychází z náhrady vedení náhradními prvky se soustředěnými parametry. Jednou z nejrozšířenějších náhrad použitelných pro vedení 110 kV je náhrada tzv.  $\pi$ -článkem. Soustředěné náhradní parametry vedení se pro  $\pi$ -článek stanoví následovně: induktivní reaktance  $X = 2\pi \cdot f \cdot L$ , kapacitní susceptance  $B = 2\pi \cdot f \cdot C$ , náhradní podélná impedance je  $\bar{Z} = R + j \cdot X$  a příčná admittance  $\bar{Y} = G + j \cdot B$ . [2]



Obr. 2-1 Náhrada vedení  $\pi$ -článkem

Dvojbran s takovou jednoduchou vnitřní strukturou spojení prvků nahrazuje vedení s homogenně rozloženými parametry v ustáleném stavu s dostatečnou přesností až do jeho celkové délky asi 400 km. Pro zjednodušení výpočtů se může konduktance zanedbat ( $G = 0$ ), a pak příčná admittance dvojbranu je reprezentována ideálním kondenzátorem. [2]

## 2.2 Střídavý chod elektrické sítě

Rovnice chodu sítě vyjadřují vzájemnou závislost veličin chodu, tj. uzlových napětí a výkonů odběrů a zdrojů. Metoda uzlových napětí, která se vyznačuje jednoduchým algoritmem výpočtu vlastních a vzájemných uzlových admitancí (resp. impedancí) a snadným zakódováním konfigurace sítě, umožňuje náhradní schéma sítě popsat následující soustavou rovnic.

$$[\bar{I}] = [\bar{Y}] \cdot [\bar{U}] \quad (2.1)$$

kde prvky admitanční uzlové matice  $[\bar{Y}]$  jsou sestaveny podle algoritmu vyplývajícího z druhého Kirchhoffova zákona takto:

$i$  – tý diagonální prvek  $Y_{ii}$  je tvořen součtem admitancí všech větví incidentních s  $i$ -tým uzlem,

mimodiagonální prvek  $Y_{ij}$  je tvořen součtem admitancí všech větví spojující  $i$ -tý uzel s  $j$ -tým uzlem.

Pro výpočet jsou zadány odebírané a dodávané proudy do uzlů sítě. Prvky ES jsou zadány jejich podélnými a příčnými admitancemi. Větve vedení se modelují jako  $\pi$ -články. Dále se předpokládá, že parametry všech prvků jsou přepočteny na jedno společné vztažné napětí, a tedy modelovanou síť můžeme nahradit galvanickým spojením prvků.

Soustavu rovnic (2.1) je možno zapsat též ve tvaru:

$$\bar{I}_i = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.2)$$

kde  $n$  je počet uzlů v síti mimo uzel referenční, kterému pro zjednodušení dalších zápisů je přiřazeno číslo 0.

Jeden z uzlů sítě musí hradit neznámé proudy tekoucí v příčných větvích a vyrovnávat bilanci mezi dodávkami a odběry. Tento uzel s neznámým uzlovým proudem se nazývá bilanční uzel. Aby v soustavě rovnic (2.1) byl stejný počet neznámých, jako je rovnic, je nutné v bilančním uzlu zadat napětí. Pro formální zjednodušení dalšího zápisu se přiřadí bilančnímu uzlu číslo 1. Soustavu rovnic (2.2) lze pak přepsat do tvaru:

$$\bar{I}_i = \bar{Y}_{i1} \bar{U}_1 + \sum_{j=2}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.3)$$

Odběry a dodávky v uzlech jsou zadány činnými a jalovými výkony. Pro  $i$ -tý uzel potom platí:

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{U}_i \bar{I}_i^* \quad (2.4)$$

Po vyjádření proudu z rovnice (2.4)

$$\bar{I}_i = \frac{\bar{S}_i^*}{\bar{U}_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} \quad (2.5)$$

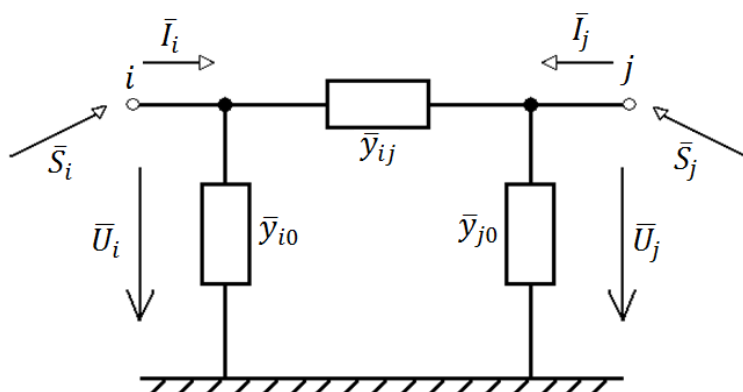
a dosazením do vztahu (2.3) se dostane:

$$\bar{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.6)$$

Po vypočítání neznámých napětí  $\bar{U}_2, \bar{U}_3, \dots, \bar{U}_n$  neznámý proud  $\bar{I}_1$  v bilančním uzlu (ve kterém je zadáno napětí  $\bar{U}_1$ ) se dopočítá při určení proudů v jednotlivých větvích sítě. Vypuštění rovnice pro bilanční uzel se nazývá eliminace bilančního uzlu. V rovnici (2.6) byla provedena eliminace bilančního uzlu, který v tomto případě hradí rozdíl mezi dodávkami a odběry a navíc ztráty činného a jalového výkonu v síti. Pro řešení soustavy rovnic (2.6) se používají iterační metody, které budou popsány dále. [1]

### 2.2.1 Výpočet toků výkonů

Pro výpočet hledaných uzlových napětí se určí toky výkonů v síti a výkonové ztráty. Prvky sítě jsou nahrazeny  $\pi$ -články podle obrázku.



Obr. 2-2 Nahrazení vedení  $\pi$ -článkem k výpočtu ztrát

Proud tekoucí do uzlu i:

$$\bar{I}_i = (\bar{U}_i - \bar{U}_j)\bar{y}_{ij} + \bar{U}_i\bar{y}_{io} \quad (2.7)$$

Výkon – viz rovnice (2.4)

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{U}_i\bar{I}_i^* \quad (2.8)$$

Proud tekoucí do uzlu j:

$$\bar{I}_j = (\bar{U}_j - \bar{U}_i)\bar{y}_{ij} + \bar{U}_j\bar{y}_{j0} \quad (2.9)$$

Analogicky výkon:

$$\bar{S}_j = P_j + jQ_j = \bar{U}_j\bar{I}_j^* \quad (2.10)$$

Činné a jalové ztráty v tomto náhradním  $\pi$ -článku jsou dány algebraickým součtem výkonů tekoucích do uzlů  $i, j$ :

$$\begin{aligned} \Delta P_{ij} &= P_i + P_j \\ \Delta Q_{ij} &= Q_i + Q_j \end{aligned} \quad (2.11)$$

### 2.2.2 Znaménková konvence

Uvažuje-li se orientace toku výkonu (proudu) šipkou směrem do uzlu, je v odběrovém uzlu proud záporný. V uzlu se zdrojem výkonu je proud kladný a při induktivní charakteru dodávky je

rovněž kladný i jalový výkon. Následující tabulka ukazuje znaménkovou konvenci v uzlech při induktivním a kapacitním posunu proudu.

Posun proudu	Typ uzlu	
	Zdroj	Odběr
	$P > 0$	$P < 0$
Induktivní $\phi > 0$	$Q > 0$	$Q < 0$
Kapacitní $\phi < 0$	$Q < 0$	$Q > 0$

Tab. 2-1 Znaménková konvence ve zdrojových a odběrových uzlech

### 2.2.3 Podmínky určitosti chodu sítě

Ustálený chod sítě je jednoznačně určen znalostí čtyř elektrických veličin v každém uzlu sítě. Pro každý uzel se jedná o:

- absolutní hodnotu napětí  $U$
- úhel napětí  $\delta$
- činný výkon  $P$
- jalový výkon  $Q$

Z hlediska těchto čtyř veličin ( $U$ ,  $\delta$ ,  $P$ ,  $Q$ ) se uzly rozlišují podle toho, které z nich jsou zadány a které jsou pomocí rovnic ustáleného chodu dopočítány. Většinou se při praktickém výpočtu uzly dělí podle zadávaných uzlových veličin do tří skupin.

$U, \delta$ -uzel je bilanční uzel, ve kterém je zadána hodnota napětí ( $U$ ) a úhel napětí ( $\delta$ ). Jako neznámé jsou dopočítávány činný a jalový výkon. Úkolem bilančního uzlu ve výpočtu je vyrovnat nerovnováhu v bilanci uzlových výkonů. Součet dodávek se musí rovnat součtu odběrů a navíc musí bilanční uzel hradit ztráty činného a jalového výkonu v síti, které jsou známy až po ukončení výpočtu a určení výsledné výkonové bilance, resp. rozdíl v bilanci mezi dodávkou a odběrem v síti. V bilančním uzlu by měl být tedy k dispozici zdroj výkonu.

$P, Q$ -uzel je uzel se zadaným činným a jalovým výkonem, který je buď dodáván do uzlu (výroba ze zdrojů v uzlu) nebo odebírán v uzlu (spotřeba v odběrovém uzlu). Konvencí je u výpočtů rozlišována dodávka znaménkem (+) a odběr znaménkem (-). Výpočtem se v  $P, Q$ -uzlu určí napětí a jeho úhel.

$P, U$ -uzel je regulační nebo kompenzační uzel, ve kterém je zadán činný výkon a absolutní hodnota napětí. Při výpočtu ustáleného chodu se hledá, jaký jalový výkon musí být v tomto uzlu odebírán nebo dodáván, aby byla dodržena zadaná hodnota napětí. Jako další neznámá je počítán úhel tohoto napětí. Tento uzel ve skutečné síti je reprezentován výrobou ve zdroji, ve kterém je možné regulovat napětí na požadovanou hodnotu pomocí rozmezí regulace jalového výkonu.  $U$  těchto uzlů jsou zadány meze regulace jalového výkonu (dané  $PQ$ -diagramem zdroje). Při dosažení regulační meze jalového výkonu dojde k přepnutí tohoto uzlu na  $P, Q$ -uzel s tím, že jalový výkon je dán mezní hodnotou, kterou může daný zdroj dodávat nebo odebírat. [1]

Pro řešení ustáleného chodu musí síť obsahovat nejméně jeden uzel každého typu. V praxi se nejčastěji setkáváme s kombinací:

- Jeden bilanční uzel se zadanou hodnotou napětí  $U$  a hodnotou fáze napětí  $\delta$
- $k$  uzlů odběrových a zdrojových se zadanými hodnotami  $P$  a  $Q$

- $n-k-1$  uzlů regulačních se zadanými hodnotami  $U$  a  $P$  (a regulačním rozmezím  $Q_{\min}$  a  $Q_{\max}$ )
- Pro řešení chodu sítě je pak k dispozici  $2(n-1)$  rovnic ustáleného chodu sítě pro  $(n-1)$  neznámých napětí a jejich úhlů

Rychlost konvergence zvolené výpočetní metody chodu sítě závisí na konfiguraci sítě, na umístění bilančního uzlu se zdrojem výkonu a na počtu uzlů odběrových a regulačních.

Na základě praktických zkušeností je nejvhodnější, pokud je to možné, umístění bilančního uzlu v elektrickém středu sítě – obvykle je to uzel s největší admitancí (a tedy největší prvek diagonály admitanční matice). Není-li toto možné, umístí se bilanční uzel do uzlu s největší výrobou výkonu  $P$  a  $Q$ .

Při řešení ustáleného chodu sítě VVN se vychází z následujících zjednodušení, která umožní řešit síť jako jednofázovou:

- všechny parametry prvků trojfázové soustavy jsou souměrné,
- průběhy napětí a proudů jsou harmonickými funkcemi času s konstantní frekvencí 50 Hz,
- parametry vedení, transformátorů i ostatních prvků sítě jsou nezávislé na proudu a napětí,
- vedení nahrazujeme  $\Pi$ -články,
- transformátory nahrazujeme  $\Gamma$ -články nebo  $\Pi$ -články,
- odběry jsou zadány pomocí výkonů. [1]

## 2.3 Iterační metody pro výpočet ustáleného chodu sítě

### 2.3.1 Gauss-Seidlova metoda

Gauss-Seidlova iterační metoda se vyznačuje jednoduchým algoritmem výpočtu a potřebuje oproti jiným iteračním metodám poměrně krátkou dobu výpočtu na jeden iterační krok. Výpočet je ukončen v případě, že rozdíl kořenů ve dvou po sobě následujících iteračních krocích je menší než zadaná přesnost výpočtu. Nevýhodou je však její relativně pomalá konvergence (zvláště u málo zauzlených sítí). Dále je potřeba volit vysokou přesnost výpočtu (velmi malé  $\varepsilon$ ) jinak se může stát, že nepřesně vypočítaná napětí způsobují značnou chybu v tocích výkonů a uzlových bilancích výkonů. Tyto nevýhody odstraňuje do jisté míry Newton-Raphsonova iterační metoda. [1]

Gauss-Seidlovu iterační metoda je aplikována na řešení soustavy nelineárních rovnic (2.6), která se upraví do tvaru, ve kterém lze provádět iteraci.

Vychází se ze vztahu (2.6)

$$\bar{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.6)$$

kde se rozepíše pravá strana rovnice na tři části

$$\frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} = \sum_{j=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j + \bar{Y}_{ii} \bar{U}_i + \sum_{j=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (2.12)$$

odkud se vyjádří napětí  $U_i$ . Tím se získá tvar rovnice vhodný pro iterační výpočet

$$\bar{U}_i = \frac{1}{\bar{Y}_{ii}} \left[ \frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^*} - \sum_{j=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j - \sum_{j=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j \right] \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (2.13)$$

převedením (2.13) do iteračního tvaru pro výpočet kořenů

$$\bar{U}_i^{(k+1)} = \frac{1}{\bar{Y}_{ii}} \left[ \frac{P_i - jQ_i}{(\bar{U}_i^{(k)})^*} - \sum_{j=1}^{i-1} \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{U}_j^{(k)} \right] \quad \text{pro } i = 2, 3, \dots, n \quad (2.14)$$

Výpočet je ukončen, je-li pro všechna  $i$  splněna podmínka

$$|\bar{U}_i^{(k+1)} - \bar{U}_i^{(k)}| \leq \varepsilon \quad \text{kde } \varepsilon \text{ je zadaná přesnost} \quad (2.15)$$

### 2.3.2 Newton-Raphsonova iterační metoda

Newton-Raphsonova metoda velmi rychle konverguje a obvykle potřebný počet iterací (při zadané přesnosti  $\varepsilon$ ) velmi málo závisí na velikosti řešené sítě. Nevýhodou je poměrně značné riziko divergence výpočtu.[1]

### 2.3.3 Příklad výpočtu chodu sítě Gauss-Seidlovou iterační metodou

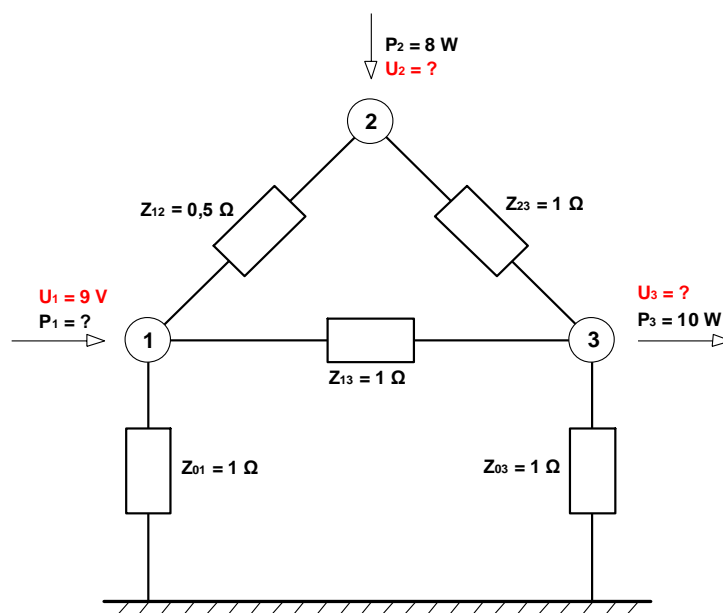
Pro jednoduchost výpočtu se uvažují pouze činné odpory větví. Tím se přivede výpočet s komplexními čísly na výpočet v oboru reálných čísel, za předpokladu, že odběry a dodávky jsou rovněž reálná čísla.

Úkolem je stanovit elektrické poměry v ustáleném chodu sítě dle schématu (3.1)

Zadané parametry:

$$Z_{13} = Z_{23} = Z_{01} = Z_{03} = 1 \, \Omega ; Z_{12} = 0,5 \, \Omega$$

$$\text{Uzel 1: } U_1 = 9 \, \text{V}; \quad \text{Uzel 2: } P_2 = 8 \, \text{W}; \quad \text{Uzel 3: } P_3 = -10 \, \text{W}$$



Obr. 2-3 Příklad elektrické sítě - zadání

## 1. Výpočet admitancí

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{1}{Z} & y_{23} &= \frac{1}{1} = 1 \text{ S} \\
 y_{12} &= \frac{1}{0,5} = 2 \text{ S} & y_{01} &= \frac{1}{1} = 1 \text{ S} \\
 y_{13} &= \frac{1}{1} = 1 \text{ S} & y_{03} &= \frac{1}{1} = 1 \text{ S}
 \end{aligned}$$

## 2. Sestavení admitanční matice

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (y_{12} + y_{13} + y_{01}) & -y_{12} & -y_{13} \\ -y_{12} & (y_{12} + y_{23}) & -y_{23} \\ -y_{13} & -y_{23} & (y_{13} + y_{23} + y_{03}) \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} (2 + 1 + 1) & -2 & -1 \\ -2 & (2 + 1) & -1 \\ -1 & -1 & (1 + 1 + 1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & -2 & -1 \\ -2 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & 3 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

3. Sestavení rovnic chodu vychází ze vztahu 2.1  $[\bar{I}] = [\bar{Y}] \cdot [\bar{U}]$ 

$$\begin{bmatrix} \frac{P_1}{U_1} \\ \frac{P_2}{U_2} \\ \frac{P_3}{U_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (y_{12} + y_{13} + y_{01}) & -y_{12} & -y_{13} \\ -y_{12} & (y_{12} + y_{23}) & -y_{23} \\ -y_{13} & -y_{23} & (y_{13} + y_{23} + y_{03}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

## 4. Číselné dosazení

$$\begin{bmatrix} \frac{P_1}{U_1} \\ \frac{P_2}{U_2} \\ \frac{P_3}{U_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & -2 & -1 \\ -2 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & 3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 9 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

Mají se tedy řešit 3 nelineární rovnice o 3 neznámých. Přitom pro výpočet neznámých napětí stačí opět řešit pouze rovnice 2, protože první rovnice pro bilanční uzel č.1 se dopočítá dodatečně a tento uzel vyrovnává celkovou bilanci výkonů v síti včetně ztrát.

$$\begin{aligned}
 \frac{8}{U_2} &= (-2) \cdot 9 + 3U_2 - U_3 \\
 \frac{-10}{U_3} &= -9 - U_2 + 3U_3
 \end{aligned}$$

Rovnice upravíme do tvaru pro výpočet Gauss-Seidelovou iterační metodou.

$$U_2 = \frac{1}{3} \left( U_3 + \frac{8}{U_2} + 18 \right)$$

$$U_3 = \frac{1}{3} \left( U_2 - \frac{10}{U_3} + 9 \right)$$

Gauss-Seidlova iterační metoda spočívá v tom, že se v prvním kroku zvolí hodnoty neznámých napětí, dosadí do první rovnice, vypočte se první neznámá a tato nová hodnota se uvažuje již v rovnicích dalších.

číslo iterace	$U_2$ [V]	$U_3$ [V]
1	9	9
2	9,2962962	5,7283951
3	8,1963173	5,1502093
4	8,0420858	5,0334724
5	8,0094131	5,0075710
6	8,0021320	5,0017186
7	8,0004841	5,0003904
8	8,0001100	5,0000888
9	8,0000250	5,0000200
10	8,0000057	5,0000046
11	8,0000013	5,0000010
12	8,0000003	5,0000002
13	8,0000000	5,0000000

Tab. 2-2 Příklad výpočtu napětí pomocí Gauss-Seidlovou iterační metodou

$$\text{Potom } P_1 = U_1(4 \cdot 9 - 2U_2 - U_3) = 9(36 - 2 \cdot 8 - 5) = 9 \cdot 5 = 135 \text{ W}$$

$$\text{Ztráty } \Delta P = P_1 + P_2 + P_3 = 135 + 8 - 10 = 133 \text{ W}$$

Toky proudů ve větvích

$$I_{12} = y_{12}(U_1 - U_2) = 2(9 - 8) = 2 \text{ A}$$

$$I_{23} = y_{23}(U_2 - U_3) = 1(8 - 5) = 3 \text{ A}$$

$$I_{13} = y_{13}(U_1 - U_3) = 1(9 - 5) = 4 \text{ A}$$

$$I_{10} = y_{01} \cdot U_1 = 1 \cdot 9 = 9 \text{ A}$$

$$I_{30} = y_{03} \cdot U_3 = 1 \cdot 5 = 5 \text{ A}$$

Toky výkonů na začátku a na konci větví

Uzel 1

$$P_{12} = I_{12} \cdot U_1 = 2 \cdot 9 = 18 \text{ W}$$

$$P_{13} = I_{13} \cdot U_1 = 4 \cdot 9 = 36 \text{ W}$$

$$P_{10} = I_{10} \cdot U_1 = 9 \cdot 9 = 81 \text{ W}$$

$$P_1 = P_{10} + P_{12} + P_{13} = 135 \text{ W}$$

Uzel 2

$$P_{21} = I_{21} \cdot U_2 = -2 \cdot 8 = -16 \text{ W}$$

$$P_{23} = I_{23} \cdot U_2 = 3 \cdot 8 = 24 \text{ W}$$

$$P_2 = P_{21} + P_{23} = 8 \text{ W}$$

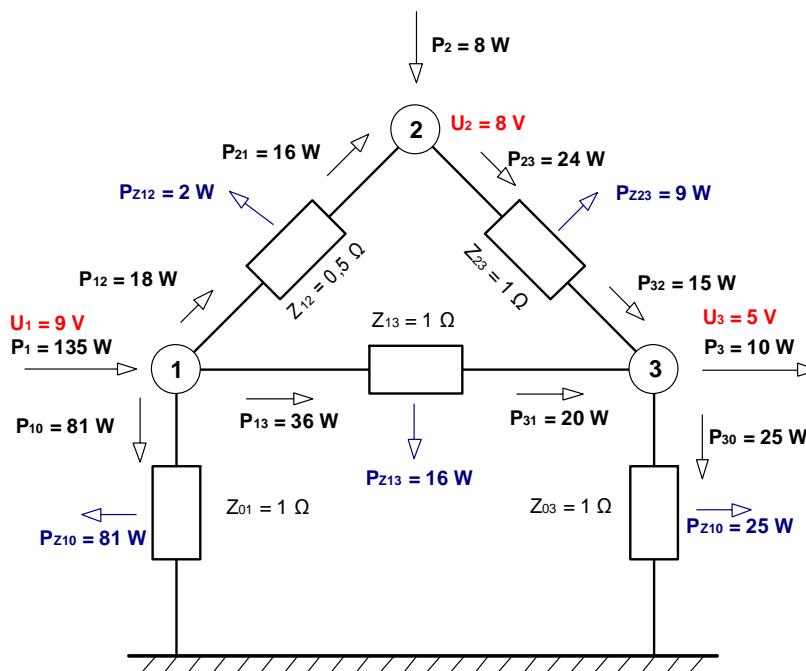
Uzel 3

$$P_{31} = I_{31} \cdot U_3 = -4 \cdot 5 = -20 \text{ W}$$

$$P_{32} = I_{32} \cdot U_3 = -3 \cdot 5 = -15 \text{ W}$$

$$P_{30} = I_{10} \cdot U_3 = 5 \cdot 5 = 25 \text{ W}$$

$$P_3 = P_{30} + P_{31} + P_{32} = -10 \text{ W}$$



Obr. 2-4 Příklad elektrické sítě - řešení

### 3 PODMÍNKY PRO PŘIPOJENÍ NOVÝCH ZDROJŮ DO SÍTĚ

Připojování nových zdrojů do sítě se řídí podmínkami, které jsou zakotveny v zákonu číslo 458/2000 Sb. (energetický zákon), který dále odkazuje na další závazné dokumenty a vyhlášky [3]. Vyhláška č. 81/2010 o podmínkách připojení k elektrizační soustavě stanoví podmínky připojení výroben elektřiny, distribučních soustav a odběrných míst zákazníků k ES a způsob stanovení podílu nákladů spojených s připojením a se zajištěním požadovaného příkonu. Podmínkami připojení zařízení žadatele k síti jsou:

- podání žádosti o připojení,
- předložení studie připojitelnosti,
- uzavření smlouvy o připojení mezi žadatelem a provozovatelem sítě,

Provozovatel sítě může od žadatele vyžádat zpracování studie připojitelnosti:

- je-li s přihlédnutím ke všem okolnostem zřejmé, že zařízení, o jehož připojení žadatel žádá, bude mít vliv na spolehlivost provozu PS nebo DS, nebo
- žádá-li se o připojení zařízení k napěťové hladině vysokého napětí a vyšších napětí

Praktická metodika pro posuzování připojitelnosti zdrojů rozptýlené výroby, tedy i OZE, do sítě je uvedena v Pravidlech provozování distribučních soustav (Kodex DS) a to zejména v příloze číslo 4 Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy [4]. Tato pravidla platí pro plánování, zřizování, provoz a úpravy výroben elektřiny, připojených k síti nn,

vn nebo 110 kV provozovatelů distribučních soustav. Pravidla shrnují hlavní hlediska, na která je zapotřebí brát zřetel při připojování výroben elektřiny do distribuční sítě. Mezi tyto výroby se řadí:

- vodní elektrárny
- větrné elektrárny
- generátory poháněné tepelnými stroji, např. blokové teplárny, kogenerační jednotky, spalování bioplynu a biomasy
- fotovoltaické elektrárny
- geotermální elektrárny

Dodržení těchto pravidel by měla na základě požadavku provozovatel distribuční sítě ověřit studii připojitelnosti tak, aby bylo zajištěno, aby připojované výroby byly vhodné a splňovaly podmínky pro paralelní provoz s distribuční sítí a aby bylo vyloučeno rušivé zpětné působení na síť nebo zařízení dalších odběratelů. Připojení k síti je třeba vždy projednat a odsouhlasit s provozovatelem distribuční soustavy. Na základě výsledků studie připojitelnosti provozovatel sítě stanovuje nutná opatření a podmínky připojení zařízení žadatele k příslušné síti.

Věcná náplň a rozsah studie připojitelnosti nového zdroje do sítě je stanovena v Pravidlech provozování PS a DS (Kodex PS, Kodex DS) a je upřesněna požadavky provozovatele příslušné sítě. Z hlediska posouzení žádosti a zpracování studie připojitelnosti jsou důležité technické podklady o novém zdroji, jeho charakteristika, technické parametry, lokalita umístění a termíny realizace. Na základě zpracované studie připojitelnosti se provozovatel sítě vyjádří k žádosti ve smyslu možnosti připojení, místa a termínu připojení zdroje do sítě. [4]

### 3.1 Vstupní podklady pro zpracování studie připojitelnosti

Žadatel o připojení nového zdroje do sítě musí předložit zpracovanou studii připojitelnosti provozovateli sítě, do které má být výroba připojena. Pro zpracování studie připojitelnosti mají provozovatelé sítě povinnost předat nezbytné vstupní podklady. Mezi tyto podklady patří:

- Parametry, konfigurace a zapojení sítě včetně připravovaného rozvoje sítě k časovému horizontu připojení nového zdroje.
- Uvažovaná konfigurace a nasazení zdrojů připojených do sítě.
- Respektování nových zdrojů v oblasti dle již schválených žádostí o připojení.
- Předpokládané zatížení – odběry v síti v požadovaných bilančních stavech pro síťové výpočty (zimní maximum zatížení, letní stav) pro časový horizont připojení nového zdroje.

Investor nového zdroje musí mít pro zpracování studie připojitelnosti k dispozici vstupní podklady o novém zdroji, které obsahují:

- Charakteristika zdroje – technologie výroby elektrické energie
- Celkový instalovaný výkon (požadovaný rezervovaný výkon k připojení do sítě, instalovaný výkon jednotek, atd.)
- Termíny předpokládané realizace, případně etapy výstavby a termín připojení k síti.
- Lokalita umístění zdroje a předpokládané místo připojení do sítě
- Technické parametry zdroje:
  - Parametry generátorů, případně měničů (FVE).
  - Parametry blokových transformátorů. [4]

## 3.2 Výpočetní analýzy vlivu připojení nového zdroje do sítě

V souladu s PPDS [4] a podle upřesnění provozovatele sítě musí studie připojitelnosti zahrnovat následující analýzy:

- Zatěžování vedení v charakteristických stavech sítě, pro plné schéma zapojení sítě
  - Zatěžování prvků sítě (vedení a transformátory) bez nového zdroje a po připojení nového zdroje vůči maximální dovolené proudové zatížitelnosti jednotlivých prvků
- Splnění spolehlivostní kritéria N-1 v oblasti připojení nového zdroje.
  - Kontrola spolehlivosti podle kritéria N-1 je chápána jako výpadek jednoho vedení, tj. přerušení jednoho proudového okruhu, nebo výpadek jednoho transformátoru.
  - Zatěžování vedení při neúplném zapojení sítě bez nového zdroje a po připojení nového zdroje.
- Kontrola napěťových poměrů a změny napětí vlivem provozu nového zdroje
  - Napěťové poměry v síti s novým zdrojem a změny napětí při náběhu nebo vypnutí nového zdroje vzhledem k dovoleným mezím změny napětí  $\Delta U$ .
  - Požadavky na řízení napětí a jalového výkonu u nového zdroje.
- Kontrola zkratových poměrů
  - Analýza zkratových poměrů se provádí podle metodiky normy IEC 60909-0
  - Počítány jsou 3-pólové a 1-pólové zkraty a veličiny (zkratové proudy)  $I_{th}$ ,  $I_p$  a  $I_k$ , hodnoty jsou porovnány se zkratovým dimenzováním příslušných zařízení
- Posouzení zpětných vlivů nového zdroje
  - Vliv provozu nového zdroje na napětí.
  - Vliv nového zdroje na velikost flikru.
  - Vliv nového zdroje na výskyt vyšších harmonických.
  - Vliv nového zdroje na útlum signálu HDO. [4]

## 3.3 Doporučení z výsledků síťových analýz pro připojení nového zdroje

- Návrh nezbytných úprav a opatření v síti v souvislosti s připojením nového zdroje
  - Na základě výsledků chodu sítě a kontroly spolehlivosti podle kritéria N-1 se doporučí nejvhodnější způsob připojení nového zdroje do sítě.
  - Jsou doporučeny nezbytné úpravy a posílení dalších síťových prvků pro připojení nového zdroje tak, aby byly splněny požadavky Kodexu DS
  - Na základě kontroly zkratových poměrů se doporučí nezbytná opatření pro splnění požadavků na zkratové dimenzování prvků sítě (posílení zkratové odolnosti, změny parametrů zdroje, blokových transformátorů, změny zapojení, atd.).
- Možná opatření v případě nevyhovujících výsledků síťových analýz pro připojení nového zdroje
  - Další dodatečná posílení sítě (nové vedení, zdvojení stávajících linek, posílení sítě).
  - Posun termínů připojení do pozdějších časových horizontů (kdy již bude realizováno posílení sítě).

- Změna místa připojení do vhodnější lokality sítě.
- Snížení instalovaného výkonu nového zdroje.
- Provozní operativní omezování dodávky výkonu z nového zdroje v nutných případech podle požadavků provozovatele sítě (neúplná konfigurace/změna zapojení sítě, mimořádné provozní stavy). [4]

### 3.4 Omezení pro připojování nových zdrojů do sítě

#### 3.4.1 Limit dodávky výkonu z OZE a způsob provozu sítí s velkým zastoupením OZE

Obnovitelné zdroje připojené do ES ČR v současnosti již ovlivňují jak provoz distribučních sítí, tak i řízení přenosové sítě. Z tohoto pohledu je novým prvkem zejména vysoký instalovaný výkon fotovoltaických elektráren, jejichž dodávka výkonu se stává problematickou zejména v letních obdobích při nízké spotřebě elektrické energie v kombinaci s odstávkami klasických bloků (regulačních) a případnými odstávkami některých vedení z důvodů plánované údržby.

Bilanční limit pro dodávku výkonu z OZE s kolísavou dodávkou výkonu udává velikost možného soudobého pohotového výkonu dodávaného do ES ČR ze zdrojů s obtížně predikovatelnou výrobou – konkrétně FVE a VTE s ohledem na spolehlivost a provozovatelnost ES. Bilanční limit je stanovován jako jedna společná hodnota pro celou ES, bilanční limit nelze přímo technicky aplikovat na konkrétní předací místo PS/110 kV.

Bilanční limit vychází z možností ES ČR zajistit podpůrné služby pro potřeby zajištění spolehlivého provozu ES a její regulovatelnosti v daném provozním stavu. Při přípravě provozu ES ČR stanovuje operativní velikost dovoleného bilančního limitu s ohledem na aktuální bilanční poměry a dostupné podpůrné služby pro daný provozní stav provozovatel přenosové sítě ČEPS.[5]

Původně stanovený bilanční limit pro dodávku výkonu z FVE a VTE v roce 2010 byl 1650 MW. Tento limit byl v roce 2012 navýšen na 2000 – 2200 MW. Operativní konkrétní bilanční limit dodávky z FVE a VTE stanovený přípravou provozu ČEPS může být po většinu roku vyšší než udávaná hodnota (2000 – 2200 MW), respektive může překročit hodnotu stanovenou pro dané časové období. V exponovaných letních stavech však může ojediněle být i nižší než stanovená hranice například z důvodů nedostupnosti podpůrných služeb (regulačního výkonu) v ES ČR.

V případě překročení aktuálního bilančního limitu při provozu ES ČR požádá dispečer PS ČEPS jednotlivé dispečinky provozovatelů DS o snížení dodávky činného výkonu z OZE. Na základě tohoto požadavku jednotlivé dispečinky provozovatelů distribučních soustav podle možností regulace u vybraných OZE, sníží výkon těchto zdrojů. V současné době je bilanční limit dodávky výkonu z FVE a VTE nahrazen kritériem aktuální velikosti podpůrných služeb v ES. [5]

#### 3.4.2 Rezervovaný výkon na předacích místech PS/DS

Na jednotlivých předacích místech mezi přenosovou soustavou a distribuční sítí 110 kV – tj. transformátory PS/110 kV jsou stanoveny hodnoty mezních toků výkonů z PS do DS (rezervovaný příkon pro napájení spotřeby v DS) a naopak z DS do PS (rezervovaný výkon pro dodávku ze zdrojů v DS). Tyto hodnoty smluvně dohodnuté mezi provozovatelem PS ČEPS a provozovatelem distribučních sítí jsou stanovené pro každé předací místo PS/110 kV s ohledem na bezpečnost provozu ES ČR. Hodnoty rezervovaného výkonu slouží primárně pro omezení

dodávky výkonu z DS a pro povolování připojení nových zdrojů do DS. Dodržení rezervovaného přetoku výkonu je jedním z principů zajištění bezpečnosti provozu v dané oblasti a jeho opakované překročení rovněž signalizuje další potřebné posílení a rozvoj PS. Hodnota rezervovaného výkonu se uplatňuje nejvíce jako kritérium v době odlehčení zatížení ES při současně vysoké výrobě ve zdrojích v daném regionu, tedy hlavně v letním období.

Rozvoj lokální rozptýlené výroby podobně jako vyšší zastoupení OZE, vyvolává v některých předacích místech obrácení směru toku výkonu z DS do PS, mění tak dosavadní charakter provozu DS (ze spotřebních oblastí distribuce se stávají výkonově aktivní zdrojové oblasti). Toto klade vyšší nároky na řízení provozu distribučních sítí. Jako vhodné se z tohoto pohledu jeví využívání možnosti řízení lokální výroby a výroby z OZE v mezích daných legislativními podmínkami a začlenění řízení rozptýlených zdrojů přímo do řídicích systémů provozovatelů DS. [5]

### 3.4.3 Mezní výkon pro připojení zdrojů do DS

*Mezní připojitelný výkon zdrojů z hlediska transformace PS/110 kV.*

Pro každý napájecí uzel PS/110 kV je v souladu s pravidly provozování DS stanoven mezní připojitelný výkon zdrojů v dané uzlové oblasti 110 kV tak, aby nedocházelo k přetěžování transformace PS/110 kV ani při uvažování výpadku největšího z transformátorů v příslušném napájecím uzlu (kritérium N-1).

Mezní připojitelný výkon zdrojů lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$P_{mez} = \sum P_{i(N-1)} \cdot k_{TR} + P_{BALANCE} \quad (3.1)$$

- $\sum P_{i(N-1)}$  je součet instalovaného transformačního výkonu transformátorů PS/110 kV v daném napájecím uzlu PS/110 kV s vyloučením transformátoru s největším výkonem v dané transformovně.
- $k_{TR}$  je redukční koeficient zohledňující zatěžování transformátoru jalovým výkonem, přechod z instalovaného transformačního výkonu  $S_n$  [MVA] na činný výkon [MW], rezerva na možné změny zapojení sítě 110 kV (počítá se s hodnotou  $k_{TR} = 0,8$ )
- $P_{BALANCE}$  je bilance činných výkonů v daném napájecím bodě. Jedná se o rozdíl celkové spotřeby (zatížení) a celkové výroby (nasazení) se zahrnutím soudobosti výroby ze všech výrobních zdrojů v dané oblasti 110 kV napájené z příslušného transformačního uzlu PS/110 kV.[4]

*Mezní připojitelný výkon zdrojů z hlediska sítě 110 kV*

Připojitelný výkon zdrojů rozptýlené výroby do sítě 110 kV je omezen přenosovou kapacitou vedení 110 kV, která je dána proudovou zatížitelností vedení a dovolenou změnou napětí při náhlém výpadku zdroje z plného dodávaného výkonu. Provozovatel DS E.ON Distribuce požaduje, aby změna napětí při náhlém výpadku všech zdrojů v oblasti nepřekročila 2% z  $U_n$ .

Daná kritéria musí být splněna i pro neúplné schéma zapojení, tedy pro stavy N-1, které jsou v případě sítě 110 kV, uplatňována podle konfigurace a topologie sítě následovně:

- Při připojení zdroje do okružní smyčky dvojitého vedení 110 kV, která je na obou koncích připojena do napájecí transformovny PS/110 kV se při kontrole uvažuje výpadek dvojitého vedení 110 kV u napájecí rozvodny. Uvažuje se vždy výpadek vedení s větším průřezem vodičů (nejnepříznivější případ).

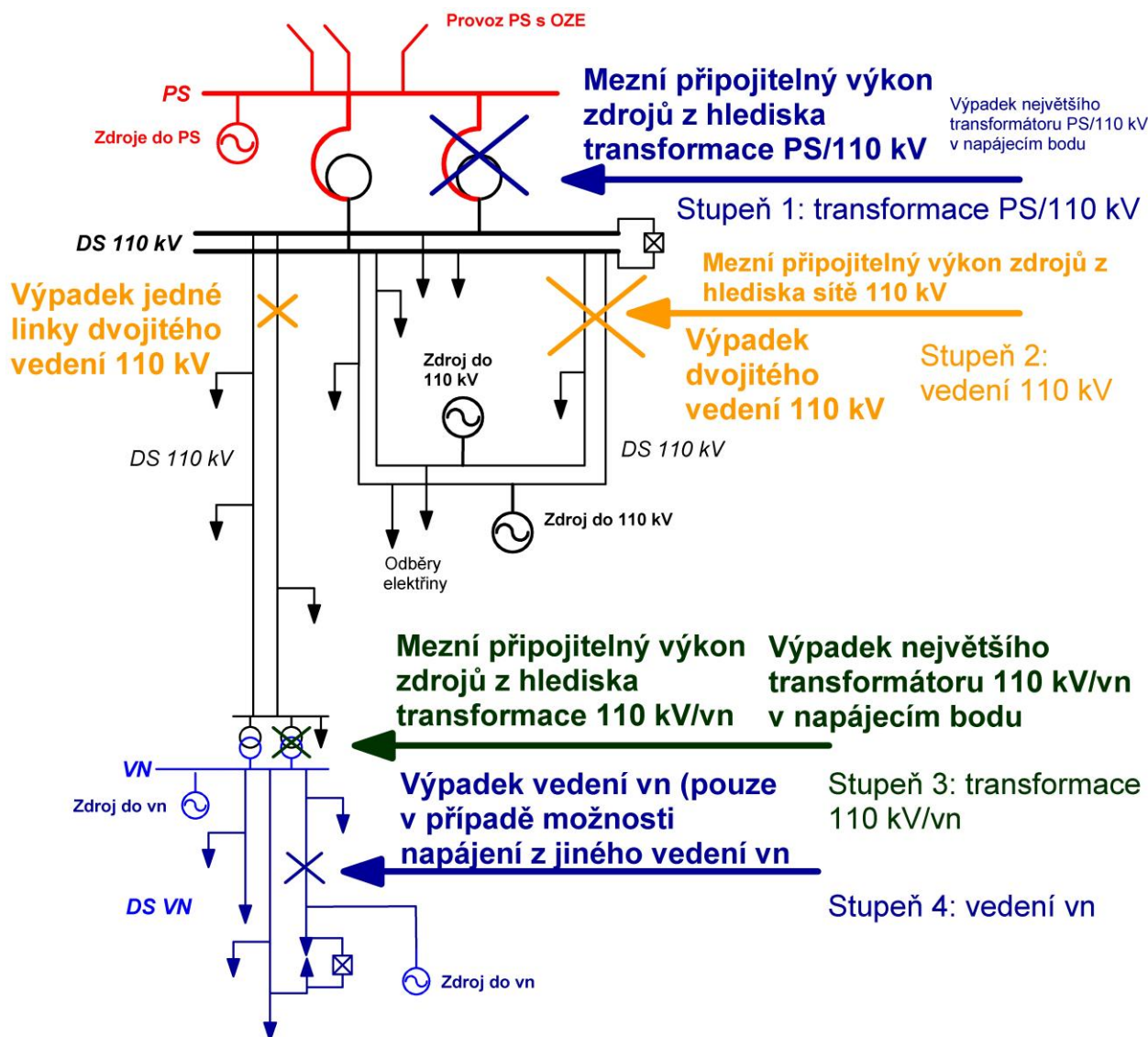
- Při připojení zdroje do uzlu 110 kV napájeného dvojitým paprskovitým vedením se uvažuje výpadek jedné větve dvojitého vedení 110 kV.

*Mezní připojitelný výkon zdrojů z hlediska transformace 110 kV / vn*

Pro transformaci 110 kV / vn z hlediska připojování nových zdrojů do DS vn lze uplatnit obdobný vztah jako pro transformaci PS/110 kV, vzorec (3.1) převedený na poměry transformace 110 kV / vn. [5]

Schematicky je stanovení mezního připojitelného výkonu zdrojů do DS uvedeno na obr. 3-1. Připojitelný výkon zdrojů rozptýlené výroby je stanoven na základě rozdělení vertikální struktury přenosu výkonu mezi napěťovými hladinami do 4 stupňů:

- Stupeň 1: transformace PS/110 kV
- Stupeň 2: vedení 110 kV
- Stupeň 3: transformace 110 kV/vn
- Stupeň 4: vedení vn (není předmětem kontroly v této práci)



Obr. 3-1 Stanovení volného výkonu pro připojení nových zdrojů do jednotlivých hladin napětí DS

## 4 ZDROJE A SÍTĚ 110 kV V UZLOVÉ OBLASTI SOKOLNICE A ZPŮSOB JEJICH ŘÍZENÍ

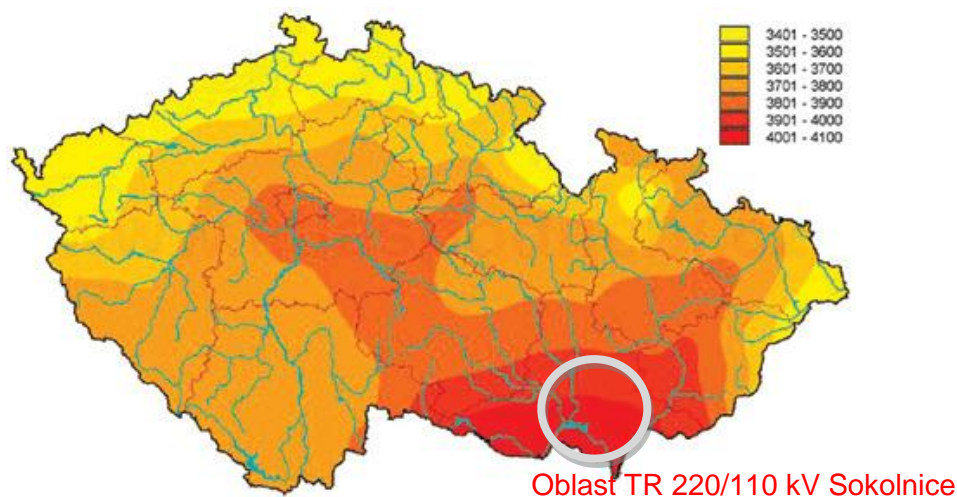
Uzlová oblast 110 kV napájená z transformátorů 220/110 kV Sokolnice pokrývá region jižně od Brna až po hranice s Rakouskem a Slovenskem. V této oblasti jsou různé typy zdrojů připojené rozptýleně do všech úrovní napětí a míst distribuční soustavy. Do elektrické sítě zde bylo připojeno v letech 2009 – 2010 velké množství nových zdrojů s rozsahy instalovaného výkonu od jednotek kW až po desítky MW, především fotovoltaické elektrárny. [7]

### 4.1 Obnovitelné zdroje

#### 4.1.1 Fotovoltaické elektrárny

Oblast jihovýchodní Moravy se vyznačuje největším podílem dopadajícího slunečního záření z celé ČR, jak ukazuje obr. 4-1 [6]. Proto bylo v této oblasti nainstalováno značné množství FVE, které jsou charakteristické svojí kolísavou dodávkou elektrické energie do sítě a to pouze během dnů se slunečním svitem. Ke konci roku 2014 je z celkového instalovaného výkonu FVE připojených do elektrizační soustavy ČR 2060 MW připojeno v sítích v působnosti E.ON Distribuce zhruba polovina. V oblasti TR 220/110 kV Sokolnice je instalovaný výkon FVE 191 MW. Vzhledem k velkému počtu a instalovaného výkonu FVE v DS E.ON Distribuce byl tento provozovatel DS nucen realizovat systém pro zajištění možnosti dálkového ovládání regulace výkonu dodávaného z těchto zdrojů z dispečinku distribuční sítě E.ON.

Výstavba FVE je v současné době výrazně omezena a nepředpokládají se instalace dalších parků FVE na volném prostranství. Nové FVE budou povoleny na střechách a konstrukcích budov. Celkově se v této oblasti připravuje výstavba drobných FVE o celkovém výkonu 1,9 MW. [7]

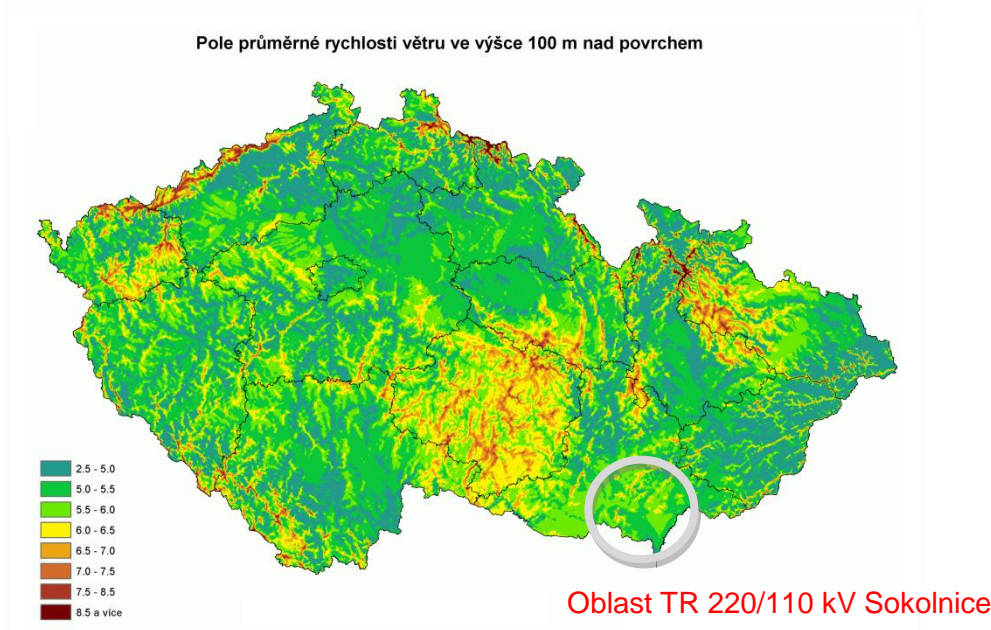


Obr. 4-1 Roční suma dopadajícího slunečního záření (MJ/m<sup>2</sup>) [6]

#### 4.1.2 Větrné elektrárny

Ke konci roku 2014 byl celkový instalovaný výkon VTE v ČR 278 MW. Zastoupení větrných elektráren v uzlové oblasti 110 kV Sokolnice není v současné době výrazné, celkový instalovaný výkon VTE činí 12 MW, do konce roku 2015 se předpokládá navýšení tohoto

výkonu na 14,6 MW. Největší větrný park Břežany u Znojma s 5 věžemi VTE disponuje celkovým instalovaným výkonem 4,25 MW.



Obr. 4-2 Větrná mapa ČR [14]

V oblasti TR 220/110 kV Sokolnice se připravovalo několik projektů dalších větrných parků, z nichž největší měl být větrný park Mackovice s 12 větrnými elektrárnami o jednotkovém výkonu 1,8 MW, celkem tedy 21,6 MW instalovaného výkonu s připojením do rozvodny 110 kV Hrušovany nad Jevišovkou. Od realizace tohoto větrného parku však investor odstoupil.[7]

### 4.1.3 Vodní elektrárny

Krajinný ráz a hydrologické podmínky oblasti jižní Moravy neumožňují velké využití potenciálu vodních toků pro výrobu elektrické energie. V oblasti UO Sokolnice nejsou instalovány vodní elektrárny o výkonu větším než 10 MW. Nacházejí se zde pouze malé vodní elektrárny, jejichž celkový výkon v UO Sokolnice činí 8 MW. [7]

### 4.1.4 Bioplynové elektrárny

V areálech zemědělských podniků jsou instalovány bioplynové stanice. Jejich celkový instalovaný výkon v UO Sokolnice činí 16 MW, připravuje se uvedení do provozu dalších bioplynových stanic o výkonu 5,9 MW.[7]

## 4.2 Elektrárna Hodonín

Elektrárna Hodonín je největším zdrojem v oblasti UO Sokolnice. V elektrárně jsou instalovány dvě kondenzační odběrové turbíny s generátory o výkonech 50 MW a 55 MW. Dva fluidní kotle, každý o výkonu 170 tun páry za hodinu, spalují severočeské hnědé uhlí. Oba kotle K3 i K4 jsou schopny spalovat biomasu, jejíž množství není dostačující pro celoroční provoz. Proto se podle dostupnosti biomasa spaluje sezóně nebo ve směsi s uhlím (spoluspalování).

Rozvodna 110 kV elektrárny Hodonín umožňuje svým připojením do sítě 110 kV vyvedení výkonu jednoho nebo obou bloků, jak do UO Sokolnice, tak do UO Otrokovice. V základním provozním zapojení je do UO Sokolnice vyveden jeden blok 55 MW. [7]

### 4.3 Ostatní zdroje

Cukrovar Hrušovany nad Jevišovkou provozuje závodní elektrárnu o výkonu 12 MW, která pracuje v režimu kombinované výroby elektřiny a tepla (KVET). Obdobně je provozován zdroj v areálu plynárenské předávací stanice Velké Němčice o elektrickém výkonu 2,8 MW připojený do uzlu 110 kV Klobouky u Brna. Celkový instalovaný výkon zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla v UO Sokolnice je 23,9 MW a připravuje se uvedení do provozu dalších 1,6 MW zdrojů KVET. [7]

### 4.4 Celkový výkon decentrálních zdrojů

V následující tabulce je uveden přehled instalovaného výkonu jednotlivých typů zdrojů připojených do distribučních sítí v uzlové oblasti TR Sokolnice 220/110 kV.

Typ zdroje	Pinst 2014	žádosti o připojení	Pinst 2015
	Pinst	Pinst	Pinst
	[MW]	[MW]	[MW]
FVE	190,95	1,89	192,84
MVE	7,62	0,93	8,55
VTE	11,96	2,60	14,56
Bioplyn	16,01	5,94	21,95
KVET	23,94	1,62	25,56
Biomasa	56,54	0,00	56,54
<b>Celkem</b>	<b>307,01</b>	<b>12,99</b>	<b>320,00</b>

Tab. 4-1 Instalovaný výkon jednotlivých typů zdrojů v oblasti TR Sokolnice 220/110 kV

### 4.5 Soudobost výroby decentrálních zdrojů

Velké množství decentrálních zdrojů nedodává všechen svůj plný instalovaný výkon současně. Projevuje se efekt soudobosti, který zohledňuje reálnou dodávku výkonu z velkého počtu drobných zdrojů současně. Tato soudobost je vyjádřena koeficientem  $f_s$ , který se stanoví pro jednotlivé typy decentrálních zdrojů. Provozovatel distribuční sítě v UO Sokolnice E.ON distribuce stanovil pro jednotlivé typy zdrojů následující koeficienty soudobosti dodávky jejich výkonu. [7]

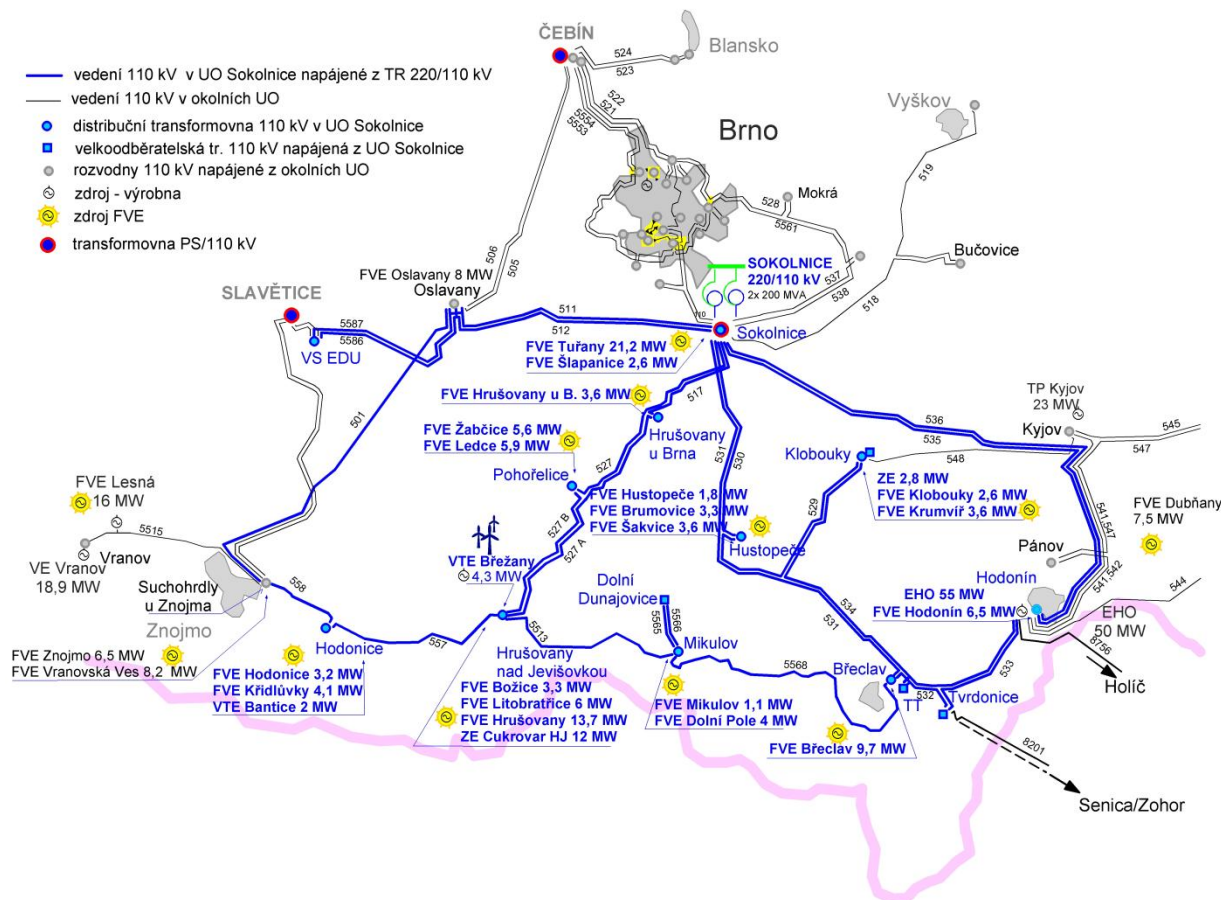
Typ zdroje	Koeficient soudobosti	Pinst 2015	Výroba se soudobostí
	$f_s$	Pinst	Pinst. $f_s$
	[-]	[MW]	[MW]
FVE	0,85	192,84	163,91
MVE	0,50	8,55	4,28
VTE	0,70	14,56	10,19
Bioplyn	0,90	21,95	19,75
KVET	0,60	25,56	15,34
Biomasa	0,90	56,54	50,88
<b>Celkem</b>		<b>320,00</b>	<b>264,35</b>

Tab. 4-2 Soudobost výroby jednotlivých typů zdrojů v oblasti TR Sokolnice 220/110 kV

## 4.6 Síť 110 kV v uzlové oblasti Sokolnice

Síť 110 kV napájené z paralelně spolupracujících transformátorů 220/110 kV Sokolnice s instalovaným výkonem 2x200 MVA zásobují transformační stanice 110/22 kV v oblasti jižně od Brna. Do sítě 110 kV v této oblasti je v základním provozním zapojení připojeno 10 distribučních transformačních stanic 110/22 kV E.ON Distribuce a 4 velkoodběratelské stanice (zásobníky plynu, trakce a vlastní spotřeba Elektrárny Dukovany).

Síť 110 kV v oblasti TR Sokolnice 220/110 kV je provozována ve 2, resp. 3 smyčkách, přičemž smyčka 110 kV Sokolnice – Hustopeče – Břeclav – Hodonín – Sokolnice je po celé délce realizována dvojítm vedením 110 kV. Ostatní smyčky 110 kV jsou provozovány pomocí jednoduchých venkovních vedení 110 kV.[8]



Obr. 4-3 Síť 110 kV v oblasti TR Sokolnice 220/110 kV [8]

## 4.7 Dispečerské řízení zdrojů v síti E.ON Distribuce

V uzlové oblasti sítě 110 kV napájené z transformace 220/110 kV Sokolnice je připojeno velké množství zdrojů rozptýlené výroby o celkovém instalovaném výkonu 307 MW. Z nichž u zdrojů o výkonu 34,1 MW je možné regulovat dodávaný výkon dispečerským řízením podle požadavků provozu soustavy. Společnost E.ON Distribuce eviduje další žádosti o připojení nových zdrojů do této oblasti.

Centrální dispečink provozovatele distribuční sítě E.ON Distribuce má k dispozici dvě možnosti řízení zdrojů:

- on-line řízení P a Q u zdrojů zapojených do dálkového systému řízení

- off-line řízení P a Q na základě dlouhodobé dohody mezi E.ON a provozovatelem zdroje

Dispečink E.ON Distribuce může regulovat samostatně jalový výkon dodávaný ze zdrojů několika způsoby:

- dle požadovaného účinníku  $\cos \varphi$
- dle požadovaného napětí
- dle požadovaného jalového výkonu
- dle charakteristiky  $\cos \varphi = f(P)$
- dle charakteristiky  $Q = f(U)$

Pokud dispečink zadá požadavek na změnu jalového výkonu u dálkově řízeného zdroje, oboustranně se požadavek potvrdí, a začnou se vysílat impulzy ke zdroji, až je dosaženo požadované hodnoty jalového výkonu.

Při řízení off-line (dlouhodobá dohoda mezi E.ON a provozovateli zdrojů) je u vybraných zdrojů dohodnuta fixní hodnota účinníku zdroje např. účinník pro pracovní dny a jiný účinník pro víkendy. Ostatní zdroje, u nichž není ze strany E.ON Distribuce zadán požadavek na změnu účinníku, udržují zdroje neutrální účinník 1, některé regulují na konstantní napětí.

#### 4.7.1 Regulační možnosti FVE z hlediska dispečerského řízení

E.ON Distribuce má v celé oblasti své působnosti do dispečerského systému zapojeno 478 ks FVE s celkovým instalovaným výkonem 820 MW. V dispečerském systému se zobrazují aktuální hodnoty U, P, Q v místě připojení zdrojů FVE do distribuční sítě.

U FVE s instalovaným výkonem vyšším než 630 kW E.ON Distribuce požaduje možnost regulace jalového výkonu. V 266 elektrárnách FVE s celkovým instalovaným výkonem 628 MW je možnost regulace činného a jalového výkonu. Regulace činného výkonu u FVE, u kterých může E.ON Distribuce regulovat, je možná ve 4 stupních  $P_{inst}$ :

- 100 % - 60 % - 30 % - 0 %  $P_{inst}$

Regulace činného výkonu se neprovádí po jednotlivých FVE, ale ve skupinách po cca 50 elektrárnách.

Regulace účinníku  $\cos \varphi$  u FVE, u které může E.ON Distribuce účinník regulovat, je možná v 5 stupních  $\cos \varphi$ :

- 0,95 kap. – 0,97 kap. – 1 – 0,97 ind. – 0,95 ind. (kapacitní je dodávka jalového výkonu do DS, induktivní je odběr jalového výkonu z DS).

Celkový potenciál možné změny jalového výkonu regulací na všech FVE v celé oblasti působnosti E.ON Distribuce je cca 200 MVAR. V současné době reguluje dispečink E.ON Distribuce dodávaný výkon FVE (P a Q) pouze ve výjimečných situacích.[7]

#### 4.7.2 Regulační možnosti ostatních zdrojů rozptýlené výroby z hlediska dispečerského řízení

U dalších zdrojů rozptýlené výroby – především u malých vodních elektráren a bioplynových stanic má dispečink E.ON Distribuce možnost regulovat činný a i jalový výkon (Q v některých případech omezeně).

U těchto malých zdrojů se uvažuje se čtyřstupňovou regulací činného výkonu ve stupních  $P_{inst}$ :

- 100 % - 70 % - 50 % - 0 %  $P_{inst}$
- regulace jalového výkonu je ve stejných stupních jako u FVE

### 4.7.3 Regulace napětí odbočkami na transformátorech

Regulaci napětí na úrovni 110 kV v uzlech PS/110 kV provádí centrální dispečink přenosové soustavy ČEPS. Dispečink E.ON Distribuce provádí regulaci na úrovni 22 kV na transformátorech 110/22 kV, napětí se udržuje na úrovni 22,8 kV +/- 0,3 kV, regulace probíhá automaticky s časovou odezvou do cca 2-3 minut (při větší odchylce napětí je regulace rychlejší). Oblast vn sítě není kompenzována tlumivkami, předpokládá se kompenzace u odběratelů.

## 5 SOFTWARE PRO ŘEŠENÍ USTÁLENÉHO CHODU SÍTĚ

Pro řešení ustáleného chodu sítě byla vyvinuta celá řada výpočetních programů, které jsou schopny řešit elektrické poměry v sítích. V této kapitole jsou dále uvedeny charakteristiky několika vybraných výpočetních programů pro simulace a analýzy chodu sítě.

### 5.1 Program LUG

Jedná se o modernizovanou verzi původního programu GLF (Graphic Load Flow), který pracoval pouze pod operačním systémem MS-DOS, naproti tomu program LUG pracuje pod operačním systémem Windows. Program je určen k řešení rozsáhlých propojených elektrických sítí zvn, vvn a vn. Program se vyznačuje možností grafické interpretace výsledků do schématu příslušné sítě.[9] Program slouží pro:

- výpočet ustáleného chodu střídavé elektrické sítě,
- výpočet chodu elektrické sítě stejnosměrným modelem,
- analýzu napěťových poměrů v síti,
- analýzu zkratových poměrů v síti,
- kontrolu spolehlivosti provozu sítě podle kritéria (N-1),
- prověření síťových závislostí vzájemného chování prvku a veličin,
- výpočet náhrad elektrických sítí (impedanční náhrady, náhrady pro chody sítě, pro zkraty),
- grafické zobrazení počítané sítě nebo její části s vyhodnocením výsledku podle typu výpočtu a požadavku zadavatele,
- kontrolu dodržování dovolených napětí v síti, kontrolu zatěžování vedení a transformátorů, kontrolu bilance výkonů v síti nebo její části,
- rozbor ztrát činného a jalového výkonu v síti.

### 5.2 Program E-Vlivy

Výpočetní program E-Vlivy umožňuje modelování vlivu připojovaných zařízení do sítí vn a nn na změny elektrických veličin v sítích zejména parametrů kvality. Program na základě výpočetní analýzy sítě je schopen vypočítat hodnoty potřebné pro zpracování studie připojitelnosti nových zdrojů do sítích vn a nn. Výpočetní metody aplikované v programu E-

Vlivy vycházejí z norem ČSN IEC 1000-2-2, ČSN EN 61000-3-2, ČSN EN 50160 a souboru norem PNE 33 3430.

Výpočet chodu sítě je proveden metodou uzlových napětí a využívá princip superpozice. Ze vstupních dat parametrů prvků sítě, pro základní harmonickou, program nejprve sestavuje jednopólový matematický model sítě. Síť je popsána soustavou lineárních rovnic s komplexními koeficienty. K jejímu řešení je v programu použita Gaussova eliminační metoda.[10]

### 5.3 Program Modes

Program MODES je určen zejména pro výpočet přechodných dějů v ES a umožňuje modelovat:

- krátkodobé dynamické chování generátorů při poruchách různých typů zkratů, včetně ohodnocení rizika ztráty synchronního chodu generátoru s ES,
- střednědobou dynamiku související s činností primární regulace a regulace otáček po výpadku zdrojů a tím vzniklým deficitem činného výkonu, případně přechodem části ES do ostrovního režimu (riziko frekvenčního kolapsu),
- dlouhodobou dynamiku související jednak s činností sekundární regulace výkonu a frekvence po vzniku deficitu činného výkonu a jednak s činností automatické změny odboček transformátorů a omezovačů proudů regulátorů buzení generátorů po vzniku deficitu jalového výkonu změnami zatížení, výpadky bloků nebo vedení (riziko napěťového kolapsu),
- dynamiku asynchronních motorů při spouštění a samonajíždění,
- statickou stabilitu - jako odezvu soustavy na malé změny stavových veličin.
- při výpočtech chodu sítě je použita Newton-Raphsonova iterační metoda.[11]

### 5.4 Programy PAS DAISY Off-Line a Bizon Projektant

Jedná se o programový systém pro výpočty režimů elektroenergetických sítí. Je určen především pro plánování rozvoje, projektování a dlouhodobou přípravu provozu rozvodných sítí všech napěťových úrovní. Programy počítají proudy, napětí v uzlech, úbytky napětí, ztráty, zkraty, obsahují podporu pro výpočty nastavení ochran v sítích vvn a vn a pro návrh jištění v sítích vn a nn.[12]

### 5.5 Program NetCalc

Program NetCalc umožňuje výpočet rozsáhlých zauzlených trojfázových sítí elektrizační soustavy v ustáleném stavu případně při přechodných dějích. Program počítá rozložení harmonických složek napětí v uzlech a proudy ve větvích, dále počítá frekvenční charakteristiky uzlových impedancí, šíření signálu vysílačů HDO. Dále program umožňuje počítat chod sítě s nesympetrickou zátěží, souměrné a nesouměrné zkraty a zemní spojení.[13]

## 6 SESTAVENÍ MODELU PRO VÝPOČET CHODU SÍTĚ V PROGRAMU LUG

Pro analýzu a řešení zadaného úkolu byl zvoleno simulovat chod sítě pomocí výpočetního programu LUG, který jak již bylo uvedeno, umožňuje řešit chod sítě v ustáleném stavu včetně analýzy napěťových a přenosových poměrů v sítích vn, vvn a zvn.

Pro řešení chodu sítě bylo nutné nejprve sestavit simulační síťový model dané oblasti 110 kV napájené z transformace 220/110 kV Sokolnice. Parametry vedení 110 kV a topologie zapojení sítě byly poskytnuty provozovatelem DS E.ON Distribuce. Jedná se o oblast, která zahrnuje 13 rozvodn s celkovým počtem 15 přípojnic. Z toho je 11 přípojnic 110 kV, na kterých je modelován odběr, který odpovídá odběru v příslušné oblasti na napěťové hladině vn a nn (transformace 110 kV/vn není modelována).

Analyzovaná oblast 110 kV zahrnuje 25 vedení 110 kV. Jedná se o venkovní vedení s průřezem vodičů 240 mm<sup>2</sup> AIFe a 185 mm<sup>2</sup> AIFe o celkové délce 600 km. Oblast sítě 110 kV Sokolnice je připojena do přenosové sítě 220 kV v rozvodně Sokolnice přes dva transformátory 220/110 kV, které jsou provozovány v paralelním provozu (sepnutý příčný spínač přípojnic v rozvodně 110 kV Sokolnice a přes smyčky vedení 110 kV).

Síťový model byl sestaven pro dva charakteristické provozní režimy z hlediska bilance výkonu a to v zimním období s větší celkovou spotřebou v celé UO 110 kV, 176 MW a v letním období s nižší celkovou spotřebou 133 MW. Uzly s odběry byly modelovány jako PQ uzly s konstantním činným a jalovým výkonem nezávislým na napětí. Předpokládá se regulace napětí na transformátorech 110 kV/vn v dostatečně širokém rozmezí.

Zdroje rozptýlené výroby (v dané UO 110 kV se jedná převážně o OZE) v sítích vvn, vn a nn jsou modelovány sumárně za celou oblast příslušného uzlu 110 kV/vn. V modelu je u každé rozvodny 110 kV přidána samostatná pomocná přípojnice 110 kV, do které je vyveden sumární výkon těchto zdrojů v dané oblasti příslušného uzlu 110 kV. Zdroje jsou zadány jako PQ uzly, regulace napětí na zdrojích se v tomto případě neuvažuje vzhledem k potřebě analýz vlivů provozních režimů zdrojů na změny napětí v síti.

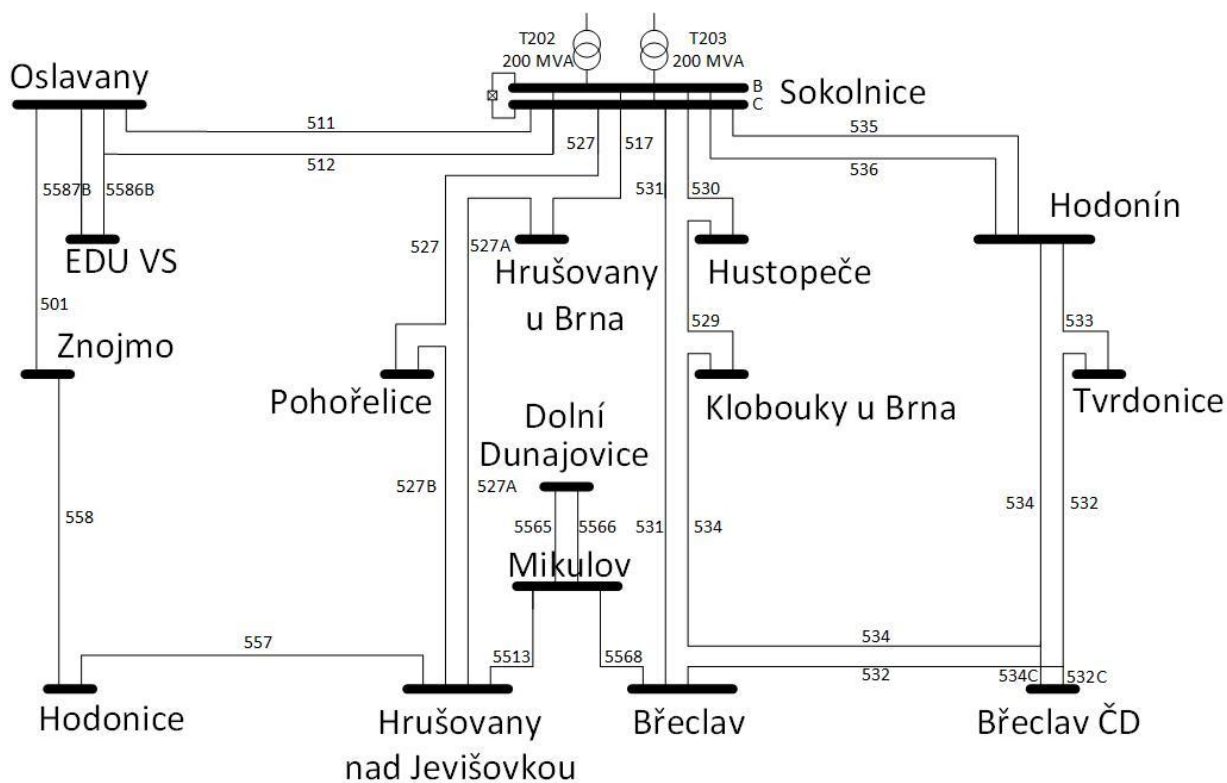
Bilanční uzel je uvažován na napěťové úrovni 220 kV v uzlu Sokolnice odkud je příslušná UO 110 kV přes transformaci 220/110 kV napájena.

	FVE		VTE		BIOPLYN		BIOMASA		KVET		MVE		Zdroje celkem	
	Pinst FVE 2015	Soudobá výroba FVE Pinst.fs	Pinst VTE 2015	Soudobá výroba VTE Pinst.fs	Pinst BIOPLYN 2015	Soudobá výroba BIOPLYN Pinst.fs	Pinst BIOMASA 2015	Soudobá výroba BIOMASA Pinst.fs	Pinst KVET 2015	Soudobá výroba KVET Pinst.fs	Pinst MVE 2015	Soudobá výroba MVE Pinst.fs	Pinst celkem 2015	Soudobá výroba celkem Pinst.fs
Soudobost fs		0,85		0,70		0,90		0,90		0,60		0,50		
<b>Název rozvodny</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>	<b>[MW]</b>
Břeclav ČD	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Břeclav	16,10	13,69	0,00	0,00	4,02	3,62	0,00	0,00	5,93	3,56	1,72	0,86	27,77	21,72
Dolní Dunajovice	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hodonice	5,13	4,36	4,60	3,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,03	0,00	0,00	9,77	7,61
Hodonín	9,10	7,73	0,00	0,00	0,04	0,04	55,00	49,50	0,00	0,00	0,00	0,00	64,14	57,27
Hrušovany n. J.	38,03	32,32	4,25	2,98	3,70	3,33	0,19	0,17	12,00	7,20	0,05	0,02	58,21	46,02
Hrušovany u B.	16,60	14,11	0,00	0,00	7,25	6,52	1,17	1,05	0,87	0,52	0,71	0,35	26,59	22,56
Hustopeče	16,23	13,80	0,00	0,00	1,35	1,22	0,15	0,14	0,26	0,16	2,41	1,21	20,40	16,51
Klobouky u B.	21,54	18,31	0,00	0,00	2,59	2,33	0,00	0,00	3,09	1,85	0,15	0,07	27,37	22,57
Mikulov	8,34	7,09	5,70	3,99	2,00	1,80	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	16,11	12,93
Pohořelice	10,00	8,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	8,50
Sokolnice	51,76	44,00	0,01	0,01	1,00	0,90	0,00	0,00	3,35	2,01	3,51	1,76	59,64	48,67
Tvrdonice	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Celkem</b>	<b>192,84</b>	<b>163,91</b>	<b>14,56</b>	<b>10,19</b>	<b>21,95</b>	<b>19,75</b>	<b>56,54</b>	<b>50,88</b>	<b>25,56</b>	<b>15,34</b>	<b>8,55</b>	<b>4,28</b>	<b>320,00</b>	<b>264,35</b>

Tab. 6-1 Instalované výkony zdrojů a jejich dodávka se zahrnutím soudobosti v jednotlivých uzlech 110 kV v UO Sokolnice

Název rozvodny	Odběry v uzlech 110 kV			
	Letní zatížení		Zimní zatížení	
	[MW]	[MVA <sub>r</sub> ]	[MW]	[MVA <sub>r</sub> ]
Břeclav	18,3	2,6	29,3	2,6
Břeclav ČD	2,0	0,3	2,1	0,3
Dolní Dunajovice	0,8	0,1	0,1	0,1
Hodonice	12,2	1,7	10,5	1,7
Hodonín	9,2	1,3	13,8	1,3
Hrušovany n. J.	13,7	2,0	11,9	2,0
Hrušovany u B.	11,5	1,6	20,6	1,6
Hustopeče	8,6	1,2	17,9	1,2
Klobouky	6,6	0,9	11,5	0,9
Mikulov	10,7	1,5	15,0	1,5
Pohořelice	6,3	0,9	8,4	0,9
Sokolnice	35,3	5,0	43,2	5,0
Tvrdonice	4,0	0,6	0,1	0,6
<b>Celkem</b>	<b>139,2</b>	<b>19,7</b>	<b>184,4</b>	<b>19,7</b>

Tab. 6-2 Odběry v jednotlivých uzlech 110 kV v UO Sokolnice v letním a zimním stavu zatížení. (současný stav dle měření)



Obr. 6-1 Síť 110 kV v oblasti TR Sokolnice 220/110 kV [8]

## 7 ANALYZOVANÉ PROVOZNÍ REŽIMY

### 7.1 Analýza napěťových poměrů při mezních stavech výroby OZE

Pro zjištění vlivu zdrojů rozptýlené výroby na elektrické poměry v dané oblasti sítě 110 kV byly výpočetně simulovány a analyzovány následující provozní režimy, vycházející se současných výkonově bilančních stavů pro základní úplné schéma zapojení sítě:

- Zimní maximum zatížení (vysoká spotřeba)
- Zatížení v letním období (nízká spotřeba)

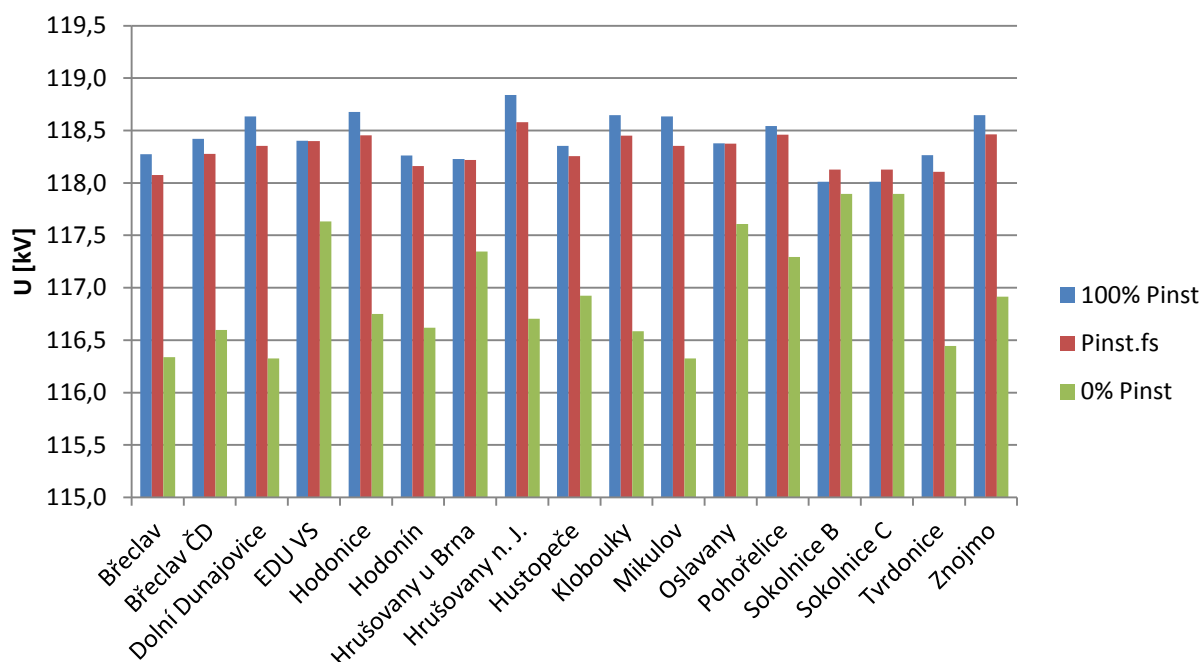
Pro oba tyto charakteristické stavy byla uvažována výroba s nasazením zdrojů:

- 100 %  $P_{inst}$  – bez uvažování soudobosti dodávky výkonu ze zdrojů
- 100 %  $P_{inst.fs}$  – s uvažování soudobosti dodávky výkonu ze zdrojů
- 0 %  $P_{inst}$  – zdroje vypnuty

Dodávka výkonu ze všech zdrojů byla nasazena s účinnkem  $\cos \varphi = 1$ , tedy s nulovým jalovým výkonem a bez uvažování regulace napětí (PQ-uzly). Při změně výkonu zdrojů se neuvažuje regulace napětí odbočkami na napájecích transformátorech 220/110 kV v Sokolnicích.

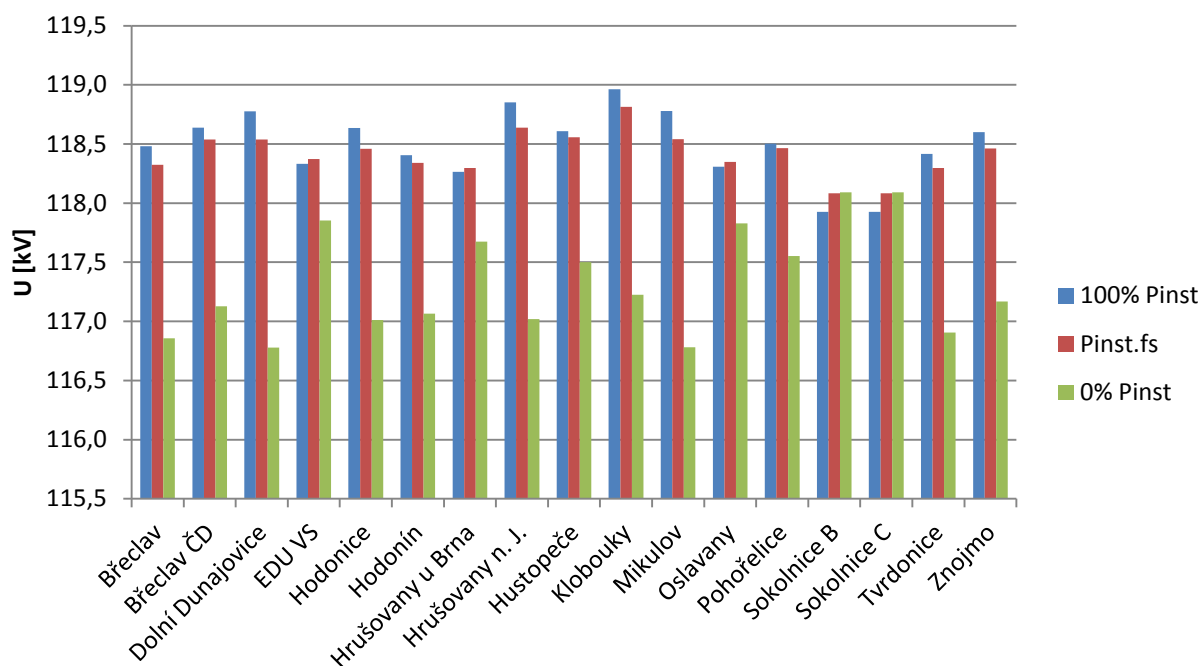
Pro tyto bilančně provozní režimy byly vyhodnoceny velikosti a změny napětí ve všech uzlech sítě 110 kV vlivem změny dodávky ze všech zdrojů rozptýlené výroby. Přitom se uvažovala změna výroby (i vypnutí) všech zdrojů v celé oblasti současně.

Vyhodnocení velikosti napětí v jednotlivých uzlech 110 kV v oblasti Sokolnice – v zimním období (vysoká spotřeba) pro tři různé stavy nasazení zdrojů ve velikosti 100 %  $P_{inst}$  bez uvažování soudobosti výroby a s uvažováním soudobosti výroby a při nulové výrobě.



Obr. 7-1 Napětí v uzlech 110 kV v závislosti na dodávce z decentralních zdrojů v UO Sokolnice v zimním období

Vyhodnocení velikosti napětí v jednotlivých uzlech 110 kV v oblasti Sokolnice – v letním období (nízká spotřeba) pro tři různé stavy nasazení zdrojů ve velikosti 100 %  $P_{inst}$  bez uvažování soudobosti výroby a s uvažováním soudobosti výroby a při nulové výrobě.

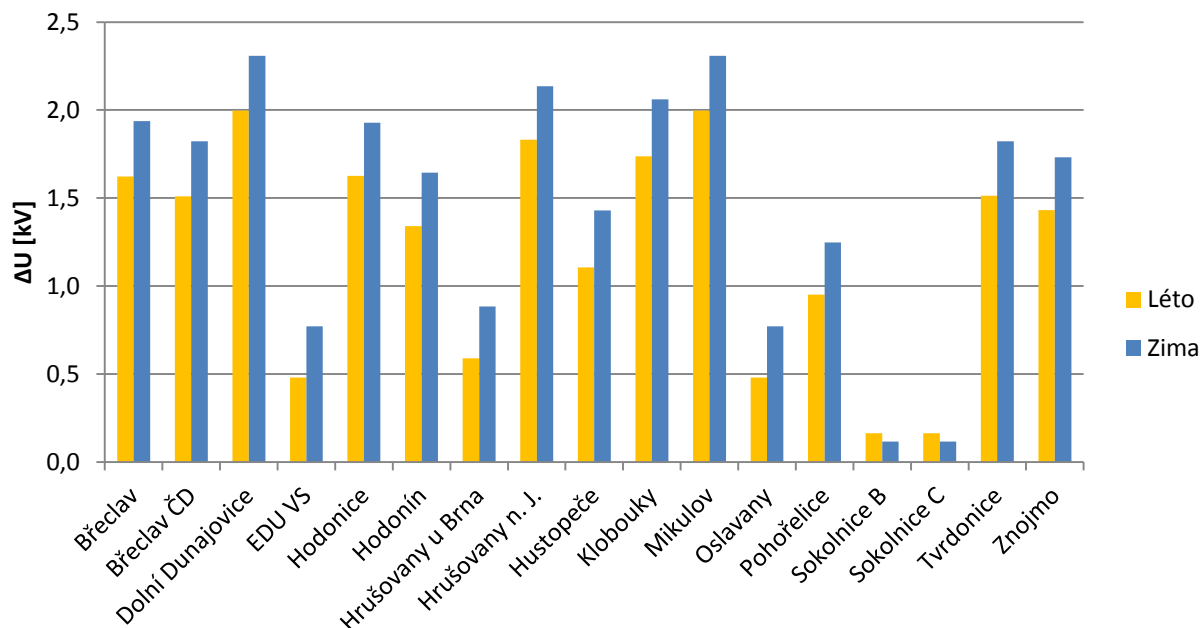


Obr. 7-2 Napětí v uzlech 110 kV v závislosti na dodávce z decentrální zdrojů v letním období

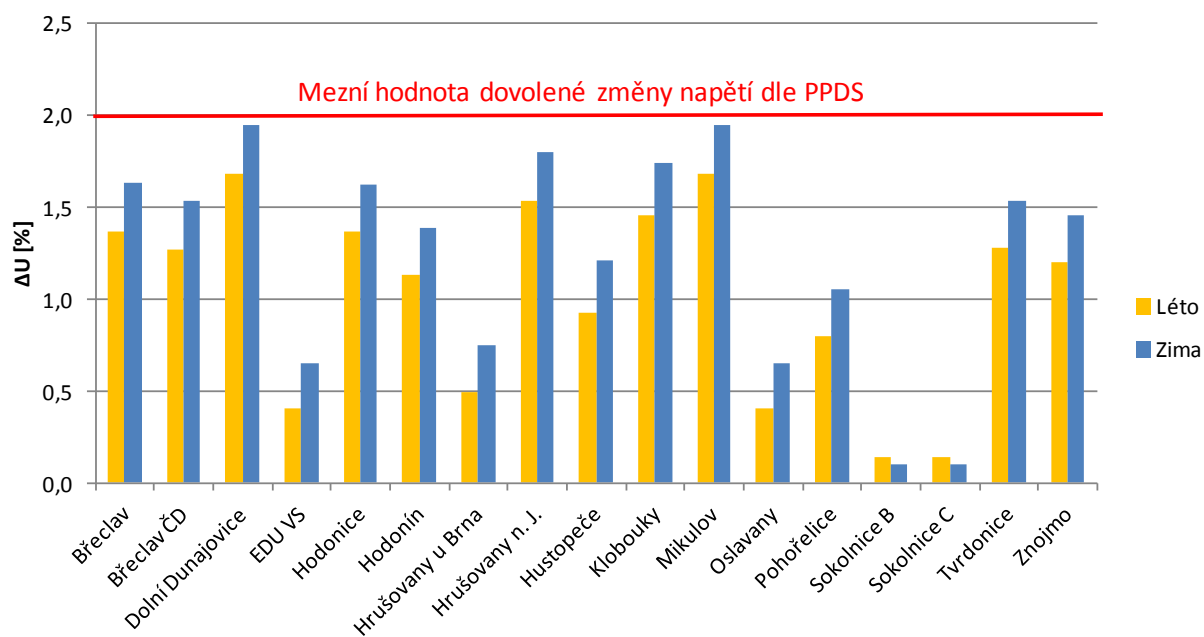
Na přípojnicích 110 kV v uzlu Sokolnice, kde je celá UO 110 kV připojena do přenosové sítě přes transformaci 220/110 kV, napětí při vypnutí výroby všech zdrojů roste. Naproti tomu u všech ostatních uzlů 110 kV v oblasti napětí při vypnutí výroby zdrojů klesá. Je to způsobeno změnou velikosti toku výkonu na impedanci transformátorů 220/110 kV v TR Sokolnice.

Z provedených výpočtů byla vyhodnocena změna napětí v jednotlivých uzlech 110 kV při změně dodávky výkonu ze všech zdrojů současně v celé oblasti z plného výkonu 100 %  $P_{inst}$  na 0 %  $P_{inst}$  pro zimní i letní stav zatížení.

K největším změnám napětí při současném vypnutí všech zdrojů v oblasti dochází v uzlech Dolní Dunajovice, Mikulov a Hrušovany nad Jevišovkou. V zimním stavu zatížení (vysoký odběr výkonu) je takto vyvolaná změna napětí vyšší než v letním stavu.



Obr. 7-3 Změna napětí v uzlech 110 kV při změně dodávky výkonu zdrojů - soudobé vypnutí všech zdrojů v oblasti Sokolnice z plného výkonu na nulový výkon v letním a zimním zatížení



Obr. 7-4 Procentní změna napětí při soudobé změně dodávky výkonu všech zdrojů v oblasti z plného výkonu na nulový výkon v letním a zimním období

Z vyhodnocení procentuální změny napětí vyplývá, že v letním ani v zimním stavu zatížení nedochází v žádném z uzlů 110 kV k překročení 2 % limitu povolené změny napětí platné pro napěťové hladiny vn a 110 kV. V zimním stavu zatížení se k 2 % limitu změny napětí nejvíce přibližují hodnoty v uzlech 110 kV Dolní Dunajovice a Mikulov.

## 7.2 Kontrola zatížení vedení 110 kV při mezních stavech

Na síťovém simulačním modelu byly provedeny výpočty ustáleného chodu sítě pro určení zatížení jednotlivých vedení 110 kV v analyzované uzlové oblasti Sokolnice při plném nasazení výroby decentralních zdrojů pro letní stav zatížení. Analýza byla provedena pro úplné schéma zapojení sítě 110 kV a pro stavy při postupném vypínání jednotlivých vedení 110 kV (kontrola spolehlivosti podle kritéria N-1).

V následující tabulce je uveden seznam vedení 110 kV v UO Sokolnice. U každého vedení je uveden typ a délka vodičů, maximální proudová zatížitelnost a jalový výkon generovaný příslušným vedením při chodu naprázdno.

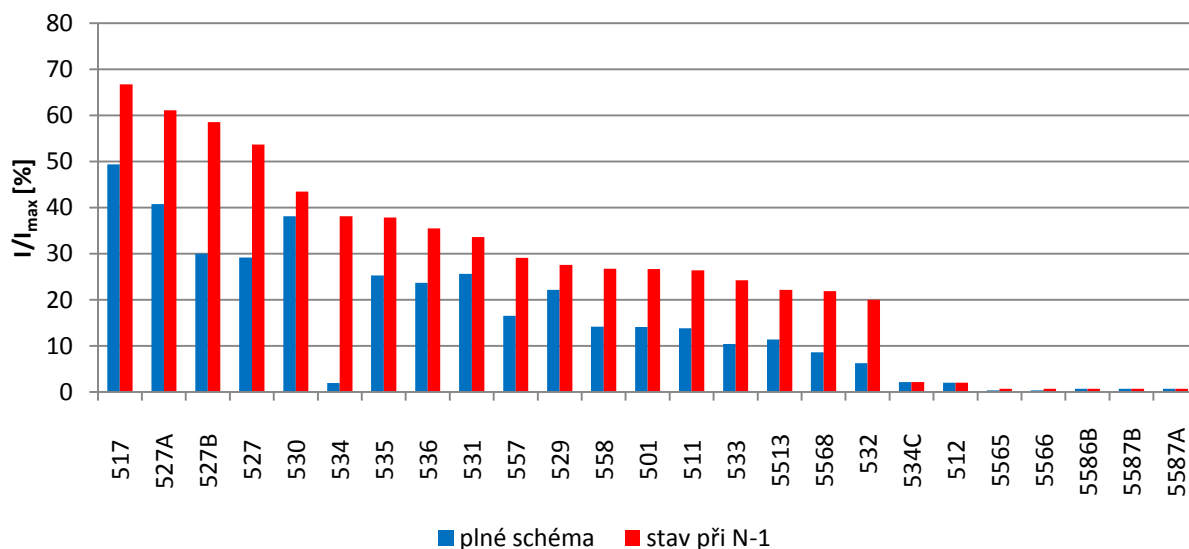
Číslo vedení	Úsek	Typ vodiče	Délka [km]	$I_{\max}$ [A]	Q [MVar]
501	Oslavany - Znojmo	AlFe 185	39,350	455	1,661
511	Sokolnice - Oslavany	AlFe 185	26,620	455	1,118
512	Sokolnice - Oslavany	AlFe 185	26,620	455	1,118
517	Sokolnice - Hrušovany u Brna	Alfe 240	13,659	530	0,561
527	Sokolnice - Pohořelice	AlFe 185	17,806	455	1,141
527A	Hrušovany u B. - Hrušovany n. J.	AlFe 185	35,028	455	1,474
527B	Pohořelice - Hrušovany n. J.	AlFe 185	23,437	455	0,970
529	Hustopeče - Klobouky u Brna	AlFe 185	23,021	455	0,970
530	Sokolnice - Hustopeče	AlFe 185	23,960	455	1,006
531	Sokolnice - Břeclav	AlFe 185	47,559	455	2,000
532	Břeclav - Tvrdonice	AlFe 185	6,180	455	0,401
532C	T odbočka ved. 532 - ČD Břeclav	AlFe 185	0,134	455	0,004
533	Hodonín - Tvrdonice	AlFe 185	18,852	455	0,627
534	Hodonín - Klobouky u Brna	AlFe 185	48,136	455	2,036
534C	T odbočka ved. 534 - ČD Břeclav	AlFe 185	0,134	455	0,004
535	Sokolnice - Hodonín	AlFe 185	60,640	455	2,520
536	Sokolnice - Hodonín	AlFe 185	60,640	455	2,550
5513	Mikulov - Hrušovany n. J.	AlFe 185	18,648	455	0,782
5565	Mikulov - Dolní Dunajovice	AlFe 240	5,261	530	0,219
5566	Mikulov - Dolní Dunajovice	AlFe 240	5,261	530	0,219
5568	Mikulov - Břeclav	AlFe 240	33,489	530	1,394
557	Hodonice - Hrušovany n. J.	AlFe 185	18,239	455	0,771
558	Znojmo - Hodonice	AlFe 185	7,914	455	0,339
5586B	Oslavany - elektrárna Dukovany	AlFe 240	19,445	530	0,827
5587A	Oslavany - elektrárna Dukovany	AlFe 240	19,760	530	0,791

Tab. 7-1 Maximální dovolená proudová zatížitelnost jednotlivých vedení 110 kV v analyzované oblasti Sokolnice a jalový výkon generovaný jednotlivými vedeními při chodu naprázdno.

Celkový jalový výkon generovaný nezatíženou sítí 110 kV (bez výroby i odběrů) v UO Sokolnice činí 25,5 MVar.

Na následujících grafech je vyhodnoceno procentní zatížení jednotlivých vedení 110 kV pro plné schéma zapojení a pro stavy N-1 vztažené k maximální dovolené proudové zatížitelnosti

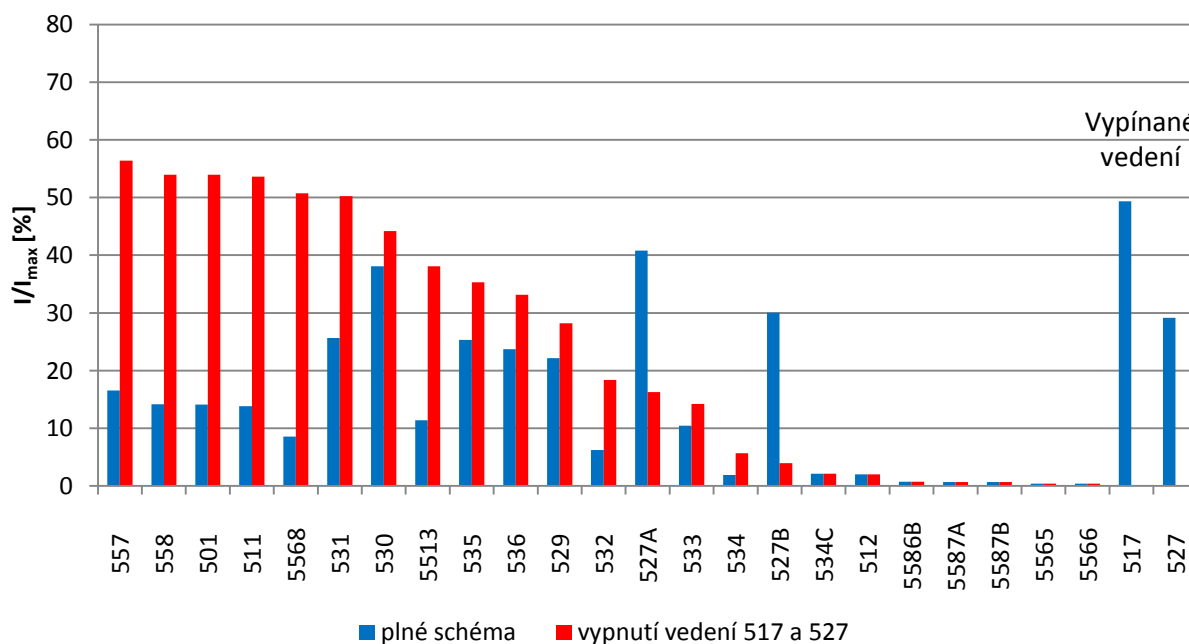
vedení, která je uvedena v tabulce 7-1. Hodnoty byly spočítány pro plný instalovaný výkon všech decentrálních zdrojů v oblasti.



Obr. 7-5 Zatížení vedení 110 kV při úplném schématu zapojení a stavu N-1 pro letní zatížení při plném nasazení výroby z decentrálních zdrojů

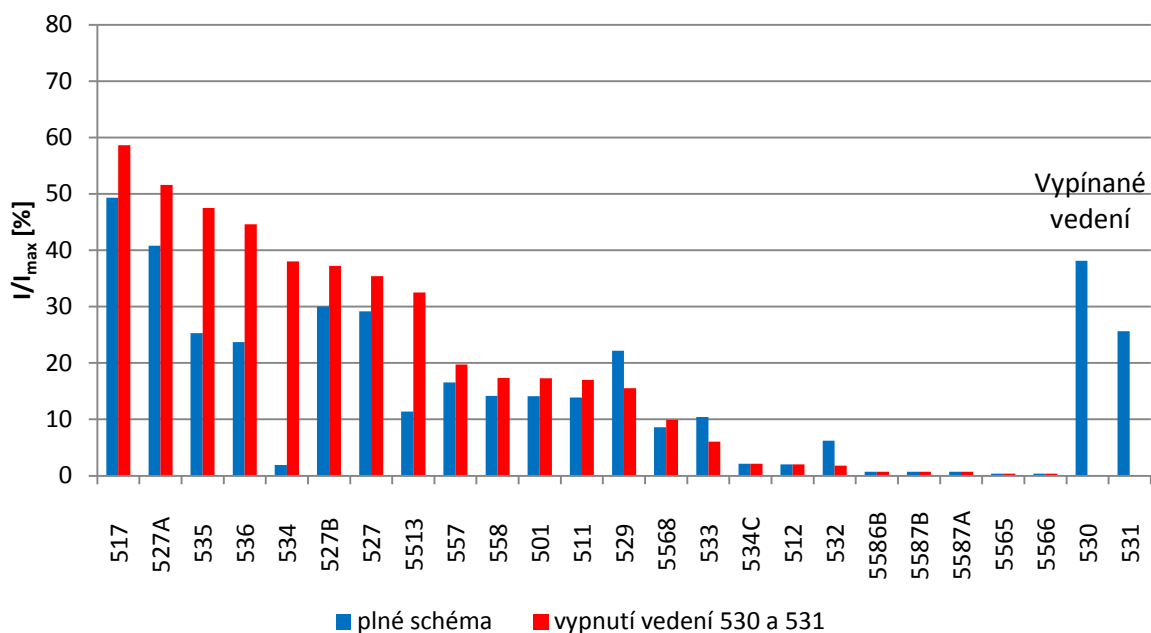
Z grafu na obr 7-5 vyplývá, že při úplném schématu zapojení nedochází u žádného vedení 110 kV k překročení zatížení vedení nad 50 %  $I_{max}$ . V neúplných stavech zapojení sítě (N-1) není překročena hodnota zatížení nad 70 %  $I_{max}$ . Největší procentní zatížení v obou případech vykazuje vedení 517 Sokolnice – Hrušovany u Brna.

Dále byly provedeny výpočty pro neúplné stavy zapojení při postupném vypnutí dvojitých vedení 110 kV z napájecí rozvodny Sokolnice.



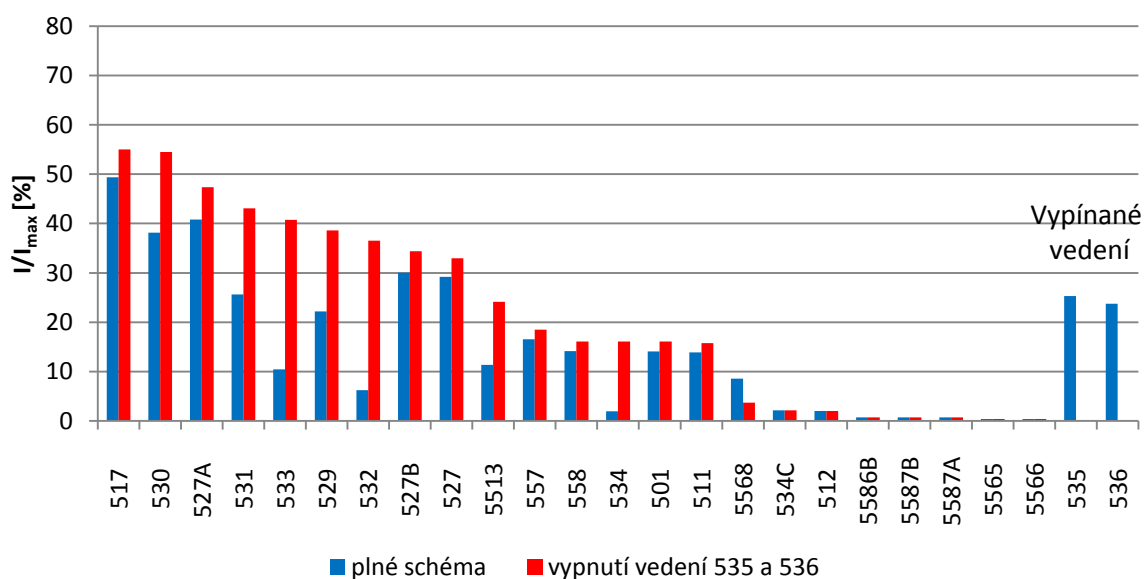
Obr. 7-6 Zatížení vedení 110 kV při úplném schématu zapojení a při vypnutí vedení 517, 527 Sokolnice – Hrušovany u Brna/Pohořelice pro letní zatížení a plné nasazení decentrálních zdrojů

Z grafu na obr 7-6 vyplývá, že při vypnutí vedení 517, 527 vykazují největší procentní zatížení vedení 511, 501, 558, 557 (do 58 %  $I_{max}$ ), jedná se o trasu navazujících vedení 110 kV Sokolnice – Oslavany – Znojmo – Hodonice – Hrušovany n. J. Velké zatížení těchto vedení je způsobeno vypnutím vedení 517 a 527 Sokolnice – Hrušovany u Brna/Pohořelice na opačném konci okružní smyčky 110 kV.



Obr. 7-7 Zatížení vedení 110 kV při úplném schématu zapojení a při vypnutí vedení 530, 531 Sokolnice – Hustopeče/Břeclav pro letní zatížení a plné nasazení decentralních zdrojů

Z grafu na obr 7-7 vyplývá, že při vypnutí vedení 530, 531 vykazují největší procentní zatížení vedení 517 a 527 A (do 59 %  $I_{max}$ ), jedná se o trasu navazujících vedení 110 kV Sokolnice – Hrušovany u Brna – Hrušovany n. J. Největší změnu zatížení vykazuje vedení 534 Hodonín – Klobouky u Brna.



Obr. 7-8 Zatížení vedení 110 kV při úplném schématu zapojení a při vypnutí vedení 535, 536 Sokolnice – Hodonín pro letní zatížení a plné nasazení decentralních zdrojů

Z grafu na obr. 7-8 vyplývá, že při vypnutí vedení 535, 536 Sokolnice – Hodonín vykazují největší procentní zatížení vedení 517 (Sokolnice – Hrušovany u Brna) a 530 (Sokolnice – Hustopeče), obě vedení se zatěžují do 55 %  $I_{max}$ . Největší změnu zatížení vykazuje vedení 532 Tvrdonice – Břeclav.

### 7.2.1 Mezní připojitelný výkon zdrojů z hlediska transformace PS/110 kV.

Byla analyzována dostatečnost transformační kapacity výkonu a stanovení volného výkonu pro připojení nových zdrojů do sítě 110 kV v UO Sokolnice z hlediska transformace 220/110 kV, dosazením hodnot do vzorce (3.1)

$$P_{mez} = \sum P_{i(N-1)} \cdot k_{TR} + P_{BILANCE} \quad (3.1)$$

Název rozvodny	Instalovaný výkon transformátorů	( $\Sigma S_n - 1$ )0,8	Odběr v letním stavu zatížení	Soudobá výroba zdrojů (P <sub>inst.fs</sub> )	Bilance výkonu (Odběr - výroba)	Mezní volný výkon na TR PS/110 kV
Současný stav 2015	[MVA]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
Sokolnice 220/110 kV	2 x 200	160	139,2	264,3	-125,1	<b>34,9</b>
Budoucí stav						
Sokolnice 400/110 kV	2 x 350	280	139,2	264,3	-125,1	<b>154,9</b>

Tab. 7-2 Aplikace vzorce pro výpočet mezního volného výkonu na transformaci 220/110 kV pro připojení nových zdrojů – současný stav s transformací 220/110 kV, 2x200 MVA a výpočet mezního výkonu pro budoucí stav s transformací 400/110 kV, 2x350 MVA

Z výpočtů podle vzorce (3.1) vyplývá, že do UO Sokolnice napájené z transformace 220/110 kV je možné připojit ještě 34,9 MW nových zdrojů.

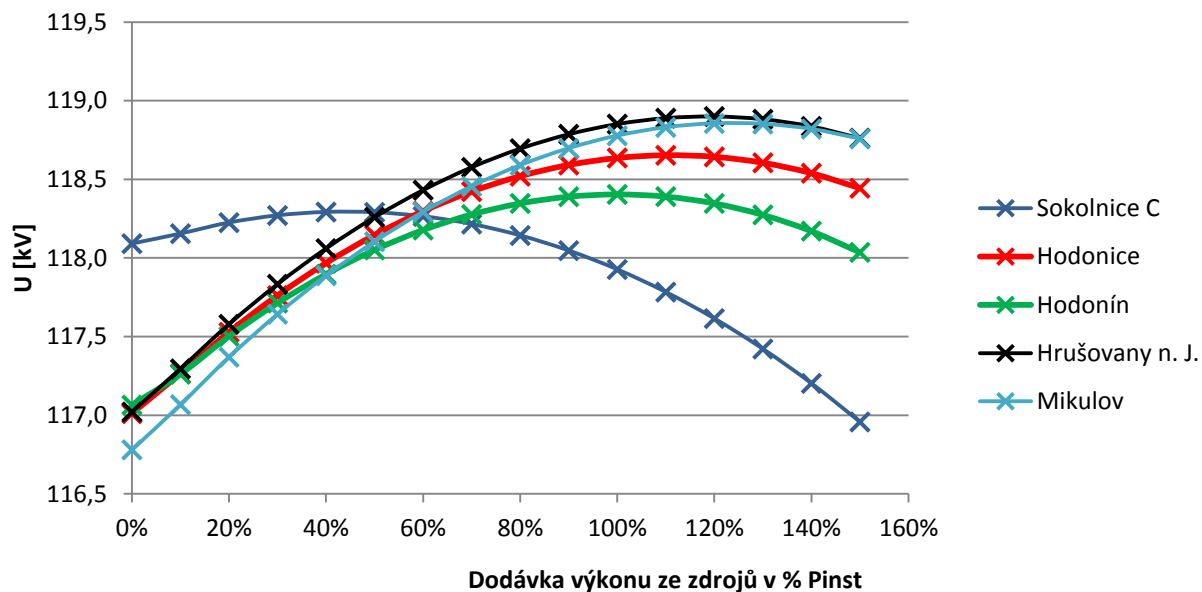
Pozn.: V transformovně PS/110 kV Sokolnice je v současné době kromě transformace 220/110 kV také instalován transformátor 400/110 kV o transformačním výkonu 350 MVA, který napájí UO 110 kV v aglomeraci města Brna. Při výpočtu mezního výkonu se však tato transformace neuplatňuje, neboť je připojena do jiné napěťové hladiny přenosové soustavy.

V budoucím rozvoji se předpokládá přechod napájení UO Sokolnice z transformace 220/110 kV (2 x 200 MVA) na transformaci 400/110 kV s transformátory 2 x 350 MVA. V tomto případě by mezní výkon umožnil při stávajících hodnotách zdrojů a odběrů a stejném rozsahu připojené UO 110 kV připojit dalších 154,9 MW nových zdrojů.

### 7.2.2 Mezní připojitelný výkon zdrojů z hlediska napěťových poměrů v síti 110 kV

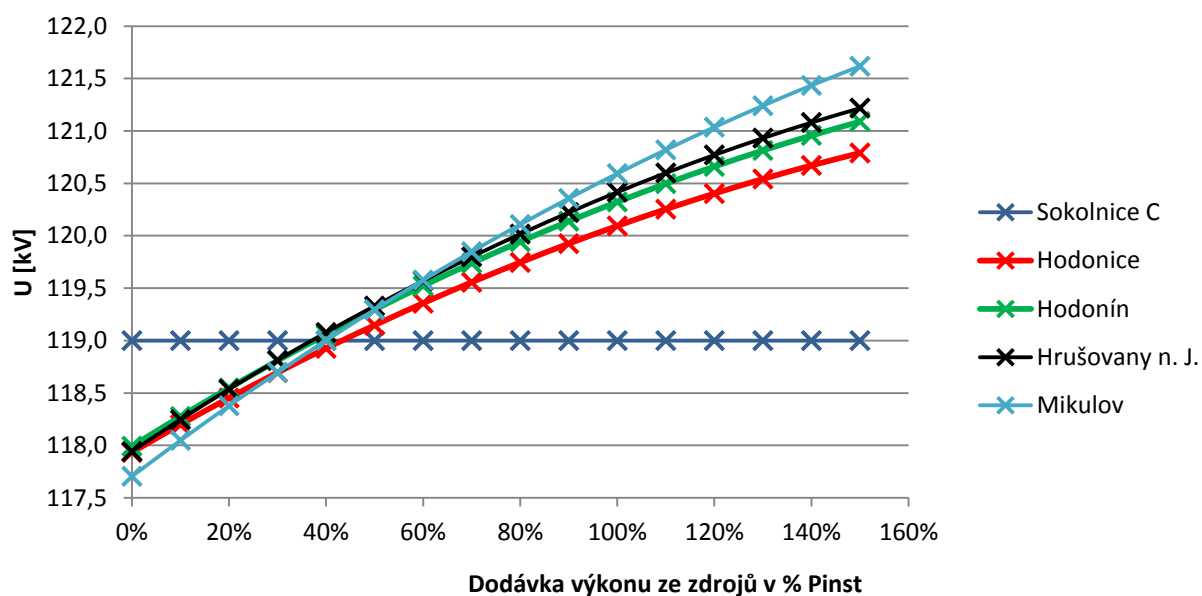
Pro zjištění možnosti připojování dalších decentrálních zdrojů byla provedena analýza změny napětí ve vybraných uzlech 110 kV při postupné změně celkové dodávky výkonu ze všech stávajících zdrojů rozptýlené výroby po 10 %  $P_{inst}$  v rozmezí 0 až 150 %  $P_{inst}$  a to pro letní stav zatížení.

Na následujícím grafu je znázorněn průběh napětí ve vybraných uzlech 110 kV při postupné změně dodávky výkonu zdrojů v celé UO Sokolnice.



Obr. 7-9 Napětí ve vybraných uzlech 110 kV při postupné změně dodávky výkonu zdrojů

Závislosti uvedené v grafu na obr. 7-9 vychází z předpokladu, že v žádném uzlu není regulace napětí, všechny uzly jsou charakteru PQ. Z grafu vyplývá, že v uzlu Sokolnice je dosaženo největší hodnoty napětí při dodávce výkonu z decentrálních zdrojů cca při 50 %  $P_{inst}$ , při kterém se obrací směr toku výkonu přes transformaci 220/110 kV a neuplatňuje se úbytek napětí na reaktanci transformátoru. V ostatních uzlech napětí roste až do dodávaného výkonu cca 110 %  $P_{inst}$ , při dalším růstu výkonu začíná napětí klesat. Změna napětí v tomto případě není omezující faktor pro připojování nových zdrojů.



Obr. 7-10 Napětí ve vybraných uzlech 110 kV při postupné změně dodávky výkonu zdrojů při konstantním napětí v uzlu Sokolnice

Závislosti uvedené v grafu na obr. 7-10 vychází z předpokladu, že v uzlu Sokolnice připojeném k PS přes transformaci 220/110 kV je udržováno konstantní napětí (119 kV) regulací

na transformátorech 220/110 kV. Za tohoto předpokladu roste napětí v ostatních uzlech 110 kV (PQ – uzly) i při zvyšování dodávky výkonu nad 100 %  $P_{inst}$ , což simulačně představuje dodávku výkonu z nově připojovaných zdrojů. Změna napětí v tomto případě překračuje dovolenou mez 2 %  $U_n$ , a proto je nutné regulovat napětí i v ostatních uzlech, kde je to možné pomocí zdrojů decentrální výroby.

### 7.2.3 Mezní připojitelný výkon zdrojů z hlediska transformace 110 kV/vn

Pro stanovení mezního připojitelného výkonu zdrojů z hlediska transformace 110 kV/vn se postupuje podle stejného vzorce (3.1) jako při stanovení mezního výkonu na transformaci PS/110 kV, který je však aplikován na oblast sítí vn a nn spadající pod příslušnou transformaci 110 kV/vn. V následující tabulce je uveden výpočet mezního připojitelného výkonu v jednotlivých uzlech 110 kV v UO Sokolnice. Z výpočtu je patrné, že meze připojitelného výkonu bylo dosaženo v uzlech Hrušovany nad Jevišovkou a Klobouky u Brna. V těchto uzlech není možné připojovat další nové zdroje decentrální výroby do napěťové hladiny vn a nn.

Název rozvodny 110 kV/vn	Instalovaný výkon transformátorů	$(\Sigma S_n - 1)0,8$	Odběr v letním stavu zatížení	Soudobá výroba zdrojů ( $P_{inst.fs}$ )	Bilance výkonu (Odběr - výroba)	Mezní volný výkon na TR 110 kV/vn
	[MVA]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]
Břeclav	2 x 40	32	18,3	21,72	-3,4	28,6
Dolní Dunajovice	2 x 25	20	0,8	0,00	0,8	20,8
Hodonice	2 x 25	20	12,2	7,61	4,6	24,6
Hodonín	3 x 40	64	9,2	57,27	-48,1	15,9
Hrušovany n. J.	2 x 40	32	13,7	46,02	-32,3	<b>-0,3</b>
Hrušovany u B.	2 x 40	32	11,5	22,56	-11,1	20,9
Hustopeče	2 x 25	20	8,6	16,51	-7,9	12,1
Klobouky u B.	1 x 25 + 2 x 10	16	6,6	22,57	-16,0	0,0
Mikulov	1 x 25 + 1 x 40	20	10,7	12,93	-2,2	17,8
Pohořelice	1 x 25	20	6,3	8,50	-2,2	17,8
Sokolnice	2 x 40 + 1 x 25	52	35,3	48,67	-13,4	38,6
Tvrdonice	1 x 25	20	4,0	0,00	4,0	24,0

Tab. 7-3 Aplikace vzorce pro výpočet mezního volného výkonu na transformaci 110 kV/vn pro připojení nových zdrojů

## 8 ZÁVĚR

Na základě popsaného způsobu matematického modelování sítí s využitím náhradních schémat vedení a transformátorů byl sestaven simulační model pro výpočet ustáleného chodu sítě 110 kV. Vlastní výpočet modelované sítě se provádí pomocí výpočetních softwarových prostředků s matematickými iteračními metodami, které jsou popsány v kapitole 2.

V kapitole 3 jsou uvedeny podmínky pro připojování nových zdrojů do sítě, které musí být splněny včetně technických faktorů a kritérií, které připojování zdrojů z technického a provozního hlediska omezují. Podmínky pro připojení zdrojů jsou dány příslušnou legislativou, vyhláškami, pravidly provozu distribučních sítí a přenosové sítě a konkrétními požadavky, které jsou stanoveny provozovatelem příslušné distribuční sítě.

Připojování nových zdrojů OZE s kolísavou dodávkou výkonu je omezen z hlediska celé ES sumárním bilančním limitem, tedy celkovou velikostí výkonu těchto zdrojů v celé ES ČR.

Stanovení mezního připojitelného výkonu je schematicky rozděleno do 4 skupin podle napěťových hladin sítí a transformátorů.

Pro UO 110 kV Sokolnice jsou popsány jednotlivé typy zdrojů decentralní výroby, které jsou do oblasti připojeny, jejich instalovaný výkon a charakter provozu. Dále se uvádí charakteristické parametry a zapojení sítě 110 kV v oblasti napájené z transformace 220/110 kV Sokolnice. Jsou též popsány možnosti dispečerského řízení činného a jalového výkonu u zdrojů rozptýlené výroby v oblasti působnosti dispečinku sítě 110 kV E.ON Distribuce se zaměřením na UO Sokolnice.

Síť 110 kV napájená z transformace 220/110 kV Sokolnice je zpracována do simulačního síťového modelu, tak aby mohla být výpočetně analyzována. Výpočty jsou prováděny pomocí softwarového programu pro výpočet a analýzy elektrických sítí LUG [9].

Pro vybrané bilanční stavy – zimní maximum zatížení a letní stav s vysokou výrobou z decentralních zdrojů – byly provedeny výpočty chodu sítě 110 kV, které byly dále analyzovány z hlediska možností připojování nových zdrojů rozptýlené výroby do distribuční sítě napájené z transformace 220/110 kV Sokolnice.

Na základě provedených výpočtů a analýz bylo zjištěno, že dle kritéria dostatečnosti transformační kapacity je na transformaci 220/110 kV Sokolnice v současné době možno připojit ještě 34,9 MW nových zdrojů decentralní výroby.

Dle kritéria dostatečnosti transformační kapacity v jednotlivých transformovnách 110 kV/vn bylo zjištěno, že meze pro připojování nových zdrojů do sítí vn a nn bylo dosaženo v rozvodnách Hrušovany nad Jevišovkou a Klobouky u Brna, v těchto rozvodnách není možné připojovat další nové zdroje do sítí vn a nn.

Ostatní kontrolované podmínky a kritéria – zatěžování vedení 110 kV v plném schématu zapojení i ve stavech (N-1), a změny napětí v sítích 110 kV vlivem připojení nebo odpojení všech zdrojů v oblasti nejsou pro připojování nových zdrojů limitujícím faktorem. Vliv proměnné dodávky zdrojů na provoz sítě je dokladován výpočty závislosti napětí na postupné změně (navyšování) dodávaného výkonu z decentralních zdrojů. Vliv nových zdrojů je vyjádřen nárůstem dodávky výkonu ze stávajících zdrojů v oblasti. Výpočetně je též dokladován vliv regulace napětí na napájecích transformátorech 220/110 kV na napětí v uzlech 110 kV při postupném navyšování dodávky výkonu decentralních zdrojů. Změny napětí nejsou v dané oblasti pro připojování nových zdrojů limitujícím faktorem, neboť napětí může být regulováno pomocí dispečerských opatření u provozovaných zdrojů a na transformaci 220/110 kV.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HALUZÍK, Evžen. *Řízení provozu elektrizačních soustav*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983, 126 s.
- [2] BLAŽEK, V., SKALA, P. *Distribuce elektrické energie*. Brno, 2003. Skriptum. VUT v Brně.
- [3] Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní zprávy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon). In: *Sbírka zákonů*. 29.12.2000.
- [4] Pravidla provozování distribučních soustav – Příloha 4: Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy, prosinec 2014, ERÚ
- [5] ČSRES-České sdružení regulovaných elektroenergetických společností [online] 2013 [cit.2013-11-24]. Dostupné z: [www.csres.cz](http://www.csres.cz)
- [6] EKOWATT. [online] 2013 [cit.2013-11-24]. Dostupné z: [www.fotovoltaika.ekowatt.cz/ekowatt.php](http://www.fotovoltaika.ekowatt.cz/ekowatt.php)
- [7] E.ON Distribuce, podklady o připojených zdrojích a přijatých žádostech o připojení nových zdrojů v UO Sokolnice. 01/2015
- [8] E.ON Distribuce, podklady o základním provozním schématu zapojení sítě 110 kV v UO Sokolnice – TR 220/110 kV, 01/2015
- [9] LUG – Program pro analýzu a výpočet elektrických sítí, verze 2014  
*Ing. Jiří Ptáček, Ph.D. a kolektiv*
- [10] Program E-vlivy. [online] 2015 [cit.2015-01-24]. Dostupné z: [http://www.egc-cb.cz/manualy/e-vlivy\\_2512.pdf](http://www.egc-cb.cz/manualy/e-vlivy_2512.pdf)
- [11] Program Modes – verze 2.2/12.  
*Ing. Karel Máslo, CSc.*
- [12] Program PAS DAISY Off-Line. [online] 2015 [cit.2015-01-24]. Dostupné z: <http://www.daisy.cz/daisycz/1024/index.html>
- [13] Program Netcalc – verze 7.0  
*Ing. Alfred Bodor*
- [14] Ústav fyziky atmosféry. [on-line] 2015 [cit.2015-03-23]. Dostupné z: <http://www.ufa.cas.cz/struktura-ustavu/oddeleni-meteorologie/projekty-egp/vetrna-energie/vetrna-mapa.html>