

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta ELEKTROTECHNICKÁ



# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**VLIV NOVÝCH TRENDŮ NA REGULACI NAPĚTÍ  
V DISTRIBUČNÍ SÍTI**

2015

Bc. Petr DENEMARK







**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta ELEKTROTECHNICKÁ  
Katedra ELEKTROENERGETIKY**

**VLIV NOVÝCH TRENDŮ NA REGULACI NAPĚTÍ  
V DISTRIBUČNÍ SÍTI**

**NEW TREND INFLUENCE ON VOLTAGE CONTROL  
IN DISTRIBUTION SYSTEMS**

Diplomová práce

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

Vedoucí práce: Ing. Zděnek MÜLLER

**Petr DENEMARK**

---

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Petr Denmark**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Vliv nových trendů na regulaci napětí v distribuční síti**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popis způsobů regulace napětí v distribuční síti.
- 2) Analýza funkce stávajících regulačních prostředků napětí v síti PREDistribuce, a.s.
- 3) Posouzení dopadů nových trendů (fotovoltaiky, elektromobily, kogenerace) na fluktuace napětí v distribuční síti.
- 4) Stanovení doporučení pro regulaci napětí v distribuční síti s integrovanými novými trendy na základě provedené analýzy.

Seznam odborné literatury:

- [1] Tlustý J., Švec J., Bannert P., Brettschneider Z., Kocur Z., Mareček P., Müller Z., Sýkora T.: Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí, ČVUT 2011.
- [2] Tlustý J., Kyncl J., Musil L., Špetlík J., Švec J., Hamouz P., Müller M., Müller Z.: Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav, ČVUT 2011.

Vedoucí: Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

### **Prohlášení**

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

V Praze dne: .....

.....

*podpis studenta*

## **Anotace**

Cílem této práce je přiblížit čtenáři problematiku regulace napětí v distribuční síti. Konkrétně se jedná o VN síť společnosti PREdistribuce a. s., ale většina zde uvedených skutečností a závěrů je obecně platná pro jakoukoliv "městskou" distribuční soustavu (převážně kabelová síť, složená z velkého množství relativně krátkých úseků).

Za tímto účelem nejprve obecně popisují elektrizační soustavu jako celek, kritéria přenosu elektrické energie, důvody a způsoby regulace napětí. Poté se zaměřují na konkrétní možnost regulace napětí pomocí automatických regulátorů určených k přepínání odboček výkonových transformátorů VVN/VN. Popisují možnosti těchto zařízení a analyzují současné způsoby jejich využití v PREDi. Následně se zaměřují na teorii týkající se parametrů těchto transformátorů, která je nezbytná pro vytvoření SW modelu regulátoru. Ten využívám k ověření dopadů nových vlivů (rozvoj obnovitelných zdrojů energie a elektromobility) a posouzení, zda změna v koncepci využívání regulátorů může mít pozitivní dopady na jejich zmírnění.

## **Klíčová slova**

Regulace napětí, distribuční soustava, automatické regulátory napětí, přepínání odboček transformátorů, dopady nových vlivů, obnovitelné zdroje energie, elektromobilita.

## *Anotace*

The aim of this thesis is to give insight into the subject of regulating voltage in the distribution network. To use actual data I describe the high voltage network belonging to the PREdistribuce a. s. company but most of the facts are true for any distribution network.

First I describe the power system on a general level, the criteria for transferring electricity, the reasons for regulating the voltage and the ways to do so. Further I focus on a possible way of regulating the voltage by using automatic regulators, which are designed to switch the high voltage/very high voltage power transformer using tap changers. I describe the options of such devices and analyze the ways they are utilized in the PREdistribuce a. s. company. Subsequently I focus on theory concerning the transformer parameters, which is necessary for creating a software regulator model. The model is used for verifying the impacts of new trends (e.g. renewable energy sources and electromobility) and for assessing whether the change of conception in using regulators can have a positive influence on softening the impact of new trends.

## *Keywords*

Voltage regulation, distribution system, automatic voltage regulators, transformer tap changers, new trends, renewable energy sources, electromobility.



## **Poděkování**

Rád bych zde poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, jímž byl pan **Ing. Zděnek MÜLLER, Ph.D.**, za čas který mi věnoval a řadu podnětných připomínek, jimiž mi pomohl k vypracování této práce.

Také bych chtěl touto formou poděkovat zaměstnancům společnosti **PREdistribuce a. s.**, ze skupiny "Řídicí systémy", za poskytnutí dat potřebných k ověření funkčnosti vytvořeného modelu regulátoru odboček transformátoru.

## Obsah

Seznam obrázků a příloh .....	1
Seznam použitých symbolů a zkratek .....	2
1. ÚVOD.....	3
2. ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA V ČR .....	4
2.1. Přenosová soustava.....	5
2.2. Distribuční soustava.....	6
2.2.1. Síť VVN.....	7
2.2.2. Síť VN.....	7
2.2.3. Síť NN.....	8
2.3. Kritéria přenosu elektrické energie .....	8
3. REGULACE NAPĚTÍ .....	10
3.1. Regulace odboček transformátoru .....	11
3.1.1. Regulátory v PREDi.....	12
4. TRANSFORMÁTORY .....	16
4.1. Náhradní schéma transformátoru .....	18
4.1.1. Dvojvinut'ové transformátory .....	18
4.1.2. Trojvinut'ové transformátory .....	20
4.2. Parametry transformátorů .....	22
4.2.1. Výkon .....	22
4.2.2. Převod .....	23
4.2.3. Ztráty .....	23
4.2.4. Napětí nakrátko .....	24
4.2.5. Proud naprázdno .....	24
4.3. Úbytek napětí na transformátoru .....	25
5. MODEL REGULÁTORU .....	28
5.1. Popis a ověření funkce .....	28
5.2. Výpočet chodu sítě.....	31
6. ANALÝZA DISTRIBUČNÍ SÍTĚ PREDi .....	35
6.1. DS PREDi bez uvažování nových trendů.....	36
6.1.1. Referenční vývod VN .....	37
6.1.2. Limitní stavy stávající DS VN.....	38
6.1.3. Vliv zavedení kompaundace u regulátoru U.....	40
6.1.4. Vyhodnocení .....	41
6.2. DS PREDi s uvažování nových trendů.....	42
6.2.1. Referenční vývod bez vlivu nových trendů.....	43
6.2.2. Referenční vývod s uvažováním nových trendů.....	44
6.2.3. Limitní stavy s uvažováním nových trendů.....	46
6.2.4. Vyhodnocení .....	48
7. ZÁVĚR.....	50
Seznam použité literatury a informačních zdrojů .....	52

## Seznam obrázků a příloh

Obr. 1: Uspořádání elektrizační soustavy v ČR [2] .....	4
Obr. 2: Rozdělení distribučních sítí v ČR [2] .....	6
Obr. 3: Hierarchická struktura řízení napětí [7] .....	10
Obr. 4: Možný negativní dopad OZE na kvalitu dodávky napětí [13] .....	13
Obr. 5: Eliminace napětí překračujícího maximální povolenou mez [13] .....	13
Obr. 6: Rozdílné meze povolené hodnoty U v závislosti na toku výkonu [13] .....	14
Obr. 7: Tabulka s počty záznamů v DD, týkajících se regulace odbočky TR 110/22kV [15] .....	15
Obr. 8: Ukázka spojeného vinutí TR do trojúhelníka a fázorového diagramu napětí [2] .....	17
Obr. 9: Ukázka spojení vinutí TR do hvězdy a fázorového diagramu napětí [2] .....	17
Obr. 10: Ukázka spojení vinutí TR do lomené hvězdy a fázorového diagramu napětí [2] .....	17
Obr. 11: Ukázka zapojení transformátoru Dy s hodinovým úhlem 1 [2] .....	18
Obr. 12: Ukázka zapojení transformátoru Dy s hodinovým úhlem 11 [2] .....	18
Obr. 13: Náhradní schéma "dvojvinutového" transformátoru ve tvaru T článku [12] .....	19
Obr. 14: Náhradní schéma "trojvinutového" transformátoru [12] .....	20
Obr. 15: Zjednodušené náhradní schéma transformátoru "nakrátko" [2] .....	24
Obr. 16: Zjednodušené náhradní schéma transformátoru "naprázdno" [2] .....	25
Obr. 17: Náhradní schéma TR a fázorový diagram pro určení úbytku napětí [2] .....	25
Obr. 18: Graf s vyjádřením chyby výpočtu $\Delta u$ pro různý charakter zátěže TR [2] .....	27
Obr. 19: Tabulka se základními údaji a parametry vybraných TR [15] .....	28
Obr. 20: Graf porovnávající shodu skutečné odbočky T102 BEE s oběma vypočtenými .....	30
Obr. 21: Graf porovnávající shodu skutečné odbočky T102 BEE s vybranou vypočtenou .....	30
Obr. 22: Schéma linie napájené kabelem 45-31 z T102 R Běchovice [15] .....	32
Obr. 23: Tabulka s parametry nezbytnými pro výpočet chodu sítě pro vybranou linii [15] .....	32
Obr. 24: Ukázka záznamu hodnot měřených v dTS 1876 za celý rok 2014 [15] .....	33
Obr. 25: Ukázka záznamu měřených hodnot v dTS 1876 v průběhu jednotlivých dnů [15] .....	34
Obr. 26: Výpočet chodu sítě pro vývod K45-31 a průběh regulace pro T102 BEE .....	37
Obr. 27: Zatížení vývodu K45-31 a maximální úbytek napětí v napájecí linii .....	37
Obr. 28: Výpočet pro venkovní vedení ALFe90 o délce 12km .....	38
Obr. 29: Zatížení vývodu a maximální úbytek napětí na vedení ALFe pro odběr 5MW .....	38
Obr. 30: Výpočet pro kabelové vedení AKCEVCEY o celkové délce 25km .....	39
Obr. 31: Zatížení vývodu a maximální úbytek napětí na kabelovém vedení pro odběr 10MW .....	39
Obr. 32: Výpočet s kompaundací pro kabelové vedení AKCEVCEY 25km .....	40
Obr. 33: Zatížení vývodu a maximální úbytek napětí pro odběr 10MW s kompaundací .....	40
Obr. 34: Přehled nejdůležitějších výsledků pro DS bez uvažování vlivu nových trendů .....	41
Obr. 35: Průběhy spotřeby a odběru při uvažování nových vlivů .....	42
Obr. 36: Výpočet pro referenční vývod a denní vývod bez nových vlivů .....	43
Obr. 37: Zatížení vývodu a maximální úbytek napětí bez uvažování nových vlivů .....	43
Obr. 38: Výpočet pro referenční vývod s uvažováním rozvoje elektromobility .....	44
Obr. 39: Zatížení vývodu a maximální úbytek napětí s uvažováním rozvoje elektromobility .....	44
Obr. 40: Výpočet pro referenční vývod s uvažováním rozvoje FVE .....	45
Obr. 41: Zatížení vývodu a maximální úbytek napětí s uvažováním rozvoje FVE .....	45
Obr. 42: Výpočet pro referenční vývod s uvažováním 2x většího rozvoje FVE .....	46
Obr. 43: Zatížení vývodu a maximální úbytek napětí s uvažováním 2x většího rozvoje FVE .....	46
Obr. 44: Výpočet pro vývod 25km AXEKVCEY s uvažováním 2x většího rozvoje FVE .....	47
Obr. 45: Zatížení vývodu 25km a maximální úbytek napětí s uvažováním 2x většího rozvoje FVE .....	47
Obr. 50: Přehled nejdůležitějších výsledků pro DS s uvažováním vlivu nových trendů .....	48

## Seznam použitých symbolů a zkratek

<b>ČSN</b>	česká státní norma
<b>DD</b>	dispečerský deník
<b>DS</b>	distribuční soustava / síť
<b>dTS</b>	distribuční stanice (transformační stanice 22/0,4kV bez telemechanizace)
<b>EE</b>	elektrická energie
<b>ERU</b>	Energetický regulační úřad
<b>FVE</b>	fotovoltaické elektrárny
<b>GIS</b>	geografický informační systém
<b>OZE</b>	obnovitelné zdroje energie
<b>PDS</b>	provozovatel distribuční soustavy
<b>PPDS</b>	pravidla provozování distribučních soustav
<b>PPPS</b>	pravidla provozování přenosové soustav
<b>PPS</b>	provozovatel přenosové soustavy
<b>PS</b>	přenosová soustava / síť
<b>R 110/22kV</b>	rozvodna (transformační stanice 110/22kV)
<b>RS</b>	rozpínací stanice (transformační stanice 22/0,4kV, vybavená elektronickými ochranami a s možností dálkového ovládní silových prvků)
<b>ŘS</b>	řídící systém (transformovny 110/22kV)
<b>TR</b>	transformátor (110/22kV nebo 22/0,4kV)
<b>VN</b>	vyšoké napětí (převážně hladina 22kV)
<b>VVN</b>	velmi vysoké napětí (převážně hladina 110kV)

*Doplňující informace uvedené v závorkách se vztahují k tématu této práce, a proto je v některých případech nelze považovat za obecně platná.*

## 1. ÚVOD

Hlavním posláním distribučních společností je zajištění dodávky energie v množství požadovaném odběrateli a kvalitě dané platnou legislativou a příslušnými normami. V případě elektrické energie představuje množství dodávaný příkon, přímo úměrný proudovému zatížení a hodnotě napětí v místě odběru. Kvalita, která je ovlivněna řadou vnějších faktorů (atmosférické vlivy, provozní manipulace v DS, poruchy, spínání spotřebičů atd.) je pak určena dodržením parametrů (provozních hodnot či charakteristik) systémových veličin při distribuci. Tyto parametry, platné pro ČR, jsou uvedeny v řadě technických norem a souvisejících dokumentů vydaných příslušnými úřady. **Základními systémovými veličinami** ovlivňujícími kvalitu dodávky elektrické energie **jsou frekvence a napětí**. Zatímco frekvence je určena samotným zdrojem elektrické energie (otáčky generátoru) a provozovatel DS jí může ovlivnit jen nepřímo snížením odběru (frekvenční odlehčování), tak parametry napětí lze do určité míry ovlivnit v každém uzlu soustavy. K tomu slouží regulace napětí a jalového výkonu, neboť mezi  $U$  a  $Q$  je velmi úzká vazba. **Důvody pro tuto regulaci nejsou jen technické, ale i ekonomické**. Kromě zajištění bezpečného provozu sítě (z pohledu statické a dynamické stability) je zde i otázka hospodárnosti (z pohledu řízení ztrát). **Proto je možnost regulace napětí důležitá nejen pro výrobce a dodavatele elektrické energie, ale i pro všechny provozovatele distribučních soustav či provozovatel soustav přenosové.**

Ve své práci jsem se zaměřil na jeden ze způsobů regulace  $U$ , pomocí automatických regulátorů, umožňujících přepínání odboček výkonových transformátoru 110/22kV za provozu. Seznámil jsem se s možnostmi a způsobem využití těchto regulátorů ve společnosti PREdistribuce a využil těchto znalostí k vytvoření vlastního model regulátoru v aplikaci MS EXCEL 2007. Ten na základě zadaného vstupního napětí a proudu určí vhodnou odbočku TR vyhovující zadaným mezím.

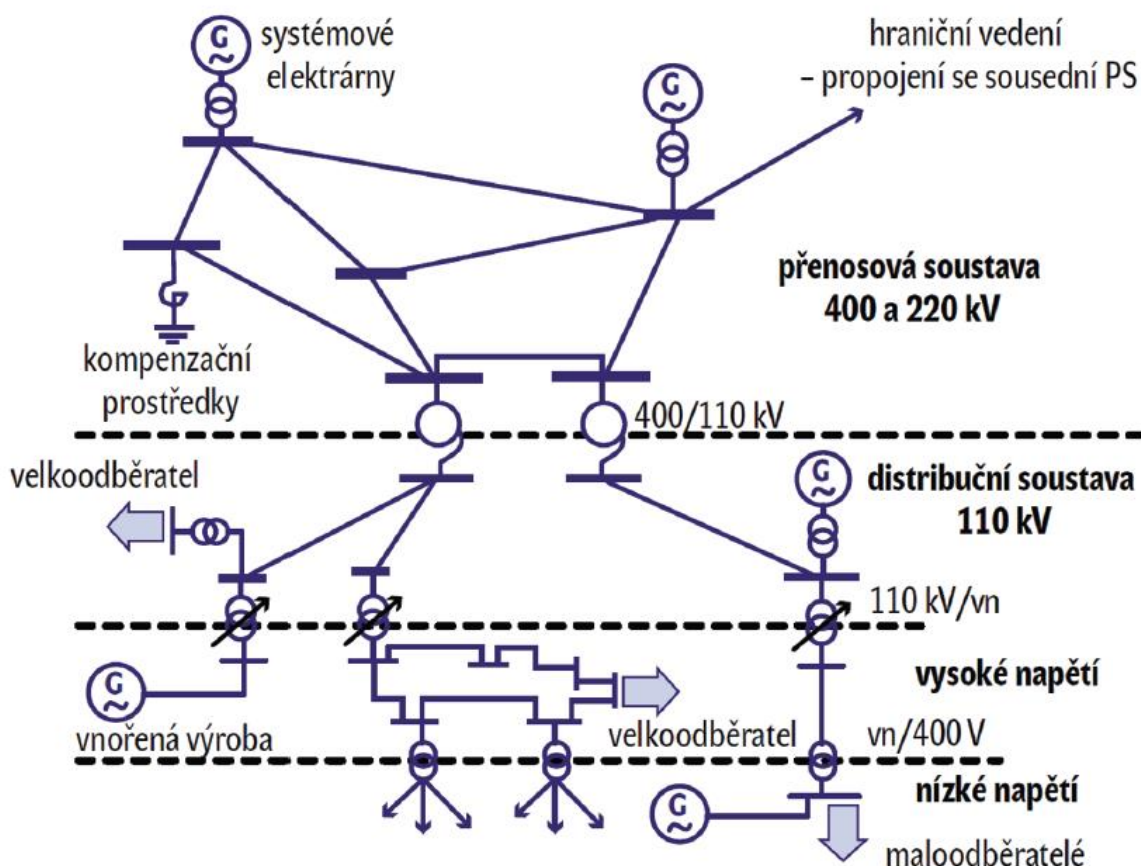
Abych ověřil správnou funkci tohoto modelu, analyzoval jsem data z dispečerského řídicího systému za celý rok 2014 a vytipoval vhodné transformátory, u nichž dochází k přepínání odboček v největším rozsahu. Pro tyto vybrané TR jsem z řídicího systému příslušných R 110/22kV získal hodnoty pětiminutových měření za určité období. Ty jsem zpracoval a využil jako vstupní data pro model. Výsledek výpočtu jsem porovnal se záznamy o chodu skutečných regulátorů.

Poté jsem z GIS systému společností získal data (typ, průřez a délka kabelu) potřebná pro výpočet úbytků napětí na jednotlivých VN liniích napájených ze zvolených TR. Vybral vhodné linie a pro ty provedl v aplikaci MATLAB Release 2007a výpočet hodnoty  $\Delta U$  v každém uzlu této linie (v pětiminutovém intervalu po dobu jednoho dne) na základě dostupných údajů o skutečném odběru. Následně jsem do jednotlivých uzlů začal promítat vlivy nových trendů (rozvoj OZE a „elektromobility“) a posoudil jejich dopad na současný způsob využití regulátorů.

## 2. ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA V ČR

Elektrizační soustavu tvoří zdroje elektrické energie, spotřebiče a sítě (včetně všech nezbytných prvků a potřebné infrastruktury) umožňujících jejich vzájemné propojení. Základ této soustavy tvoří v ČR „přenosová soustava“ (dále jen PS) jejímž provozovatelem je na základě licence udělené energetickým regulačním úřadem (ERU) podle „energetického zákona“ [1] společnost ČEPS, a.s.

Na PS nejsou napojeni jen velcí výrobci elektrické energie a provozovatelé „distribučních soustav“ (DS), ale umožňuje rovněž napojení na PS sousedních států. Základní uspořádání elektrizační soustavy je schematicky znázorněno na následujícím obrázku převzatém ze zdroje [2]:



Obr. 1: Uspořádání elektrizační soustavy v ČR [2]

## 2.1. Přenosová soustava

Soustava tvořená zařízením a vedením (kabelové a venkovní linky) 400, 220 a 110kV je zřizována a provozována ve veřejném zájmu, jedná se tedy o regulovanou činnost podléhající řadě legislativních pravidel, jejichž dodržování kontroluje převážně ERU. Technické aspekty a požadavky na rozhraní pro připojení k PS jsou specifikovány v „pravidlech provozování přenosové soustavy“ (PPPS) schválenými ERU a závaznými pro všechny, jenž s provozovatelem PS chtějí uzavřít smlouvu na užívání soustavy či spíše poskytovaných služeb. Činnosti provozovatele PS se podle zdroje [3] dělí do několika hlavních oblastí:

- **Systémové služby** – ty tvoří hlavně činnosti související se zajištěním a udržením výkonové rovnováhy v reálném čase, udržení kvality elektrické energie (EE) a případným obnovení provozu po rozsáhlém výpadku či poruše.
- **Přenosové služby** – zde se jedná hlavně o zajištění transportu elektrické energie (ve spolupráci s provozovateli DS) z místa výroby do místa spotřeby a to i v rámci zahraničních soustav.
- **Podpůrné služby** – jsou prostředky pro zajištění služeb systémových a mohou je při splnění technických a obchodních podmínek provozovatele PS nabízet všichni, kteří jsou do PS připojeni. S jejich pomocí lze například korigovat okamžité rozdíly mezi výrobou a spotřebou. Dělí se do několika kategorií, jejichž plný výčet a technické definice jsou uvedeny v „kodexu PS“ [4], mezi ty nejdůležitější patří:
  - primární regulace frekvence bloků,
  - sekundární regulace výkonu bloků,
  - sekundární regulace napětí a jalového výkonu,
  - schopnost ostrovního provozu či startu ze tmy,
  - zálohy pro okamžité zvýšení (5 a 15 minut) a snížení výkonu (do 30 minut),
  - havarijní smlouvy a operativní dodávka ze zahraničí i do zahraničí.
- **Dispečerské řízení** – provoz technického dispečinku za účelem zajištění bezpečné a spolehlivé elektrizační soustavy a řešení provozních či poruchových událostí. K udržení kvality EE a trvalé rovnováhy mezi výrobou a spotřebou je nezbytná spolupráce s výrobcí EE, dispečinky PDS a okolními PPS.
- **Zahraniční spolupráce** – bilaterální spolupráce především s provozovateli PS v sousedních státech a případná účast či zastoupení v pracovních skupinách mezinárodních organizací zabývajících se problematikou v tomto odvětví.
- **Technická infrastruktura** – správa a rozvoj prvků PS včetně vedení nezbytné dokumentace a poskytování povinných informací.



## 2.2. Distribuční soustava

Provozovatelem této soustavy, skládající se ze sítí a zařízení od úrovně 110kV, až do úrovně 0,4kV, může být fyzická či právnická osoba, která je držitelem příslušné licence udělené ERU. Na jemu vymezeném území, je PDS povinen umožnit distribuci EE a připojit k DS každého, kdo o to požádá, splňuje podmínky dané energetickým zákonem a souvisejícími vyhláškami a dodrží „pravidla provozovatel distribuční soustavy“ (PPDS). Vzhledem k tomu, že provozovatel je zodpovědný za rozvoj a provoz DS, určí místo a způsob připojení tak, aby nedošlo k ohrožení stability nebo bezpečnosti provozu sítě či některého z jejích prvků. Provozovatelé DS musí plnit nejen závazky vyplývající z licence, ale i obecně platných právních předpisů, technických norem a případně jejich napojení na PS i PPPS. PPDS nebo vybrané části se vztahují nejen na PDS a PPS, ale také na provozovatele lokálních DS, výroby EE připojené do DS, obchodníky s elektřinou a zákazníky.

V ČR jsou tři velcí regionální provozovatelé DS a řada menších, lokálních PDS, kteří většinou nejsou napojeni do PS, ale pouze do nadřazené DS. Uzemní rozdělení hlavních provozovatelů v rámci republiky je vidět na následující mapce převzaté ze zdroje [2]:



Obr. 2: Rozdělení distribučních sítí v ČR [2]



### 2.2.1. Síť VVN

Jedná se o vybrané sítě 110kV (které nejsou součástí PS) lokálně propojující transformovny 110/VN nebo zajišťující k těmto transformovným přivedení energie z „uzlových transformoven“ ZVN/VVN či VVN/VVN případně přímo vyvedení výkonu z menších elektráren (desítky MW). Tyto sítě tvoří páteř každé DS a z důvodu zajištění vysoké spolehlivosti dodávky jsou provozovány okružním způsobem. Tomuto způsobu provozování odpovídá také způsob jejich chránění před škodlivými účinky zkratových proudů pomocí distančních ochran. Ty kromě chráněného úseku, v němž jsou instalovány, mohou chránit jako záložní ochrany i úseky následující.

### 2.2.2. Síť VN

I tato část soustavy je tvořena zařízením a sítěmi provozovanými na příslušné hladině. Nejčastěji se zde setkáme s napětovou hladinou 22 a 35kV. Výjimečně a spíše lokálně se zde můžeme setkat i s nižšími napětovými hladinami 10, 6 a 3kV, od jejich provozu a rozvoji se však z důvodu standardizace upouští. Tyto sítě jsou provozovány převážně paprskovým či průběžným způsobem, který vzhledem k jasnému směru toku energie umožňuje snazší lokalizaci poruchy (s rozvojem decentralizované výroby to však přestává platit). Soustava a její prvky, zajišťují transport EE z transformoven 110/22kV do transformoven VN/0,4kV, odkud je dále distribuována k zákazníkům. I v tomto případě odpovídá způsob chránění způsobu provozování této sítě a stanice jsou vybavovány elektronickými ochranami s nadproudovým, zkratovým a případně i nulovým článkem

Vybrané uzly této sítě jsou vybavovány potřebnou telemechanikou a telemetrií, která umožňuje řízení dispečerským způsobem v reálném čase. Takto vybavené stanice se nazývají rozpínacími stanicemi (RS) a vedou z nich napájecí linie do zbývajících transformoven VN/NN, které se nazývají distribuční trafostanice (dTS). V případě, že je to možné, tvoří napájecí linie dTS uzavřené smyčky mezi RS. Tyto smyčky jsou na vhodném místě přerušeny a v případě potřeby umožňují připojení dTS k jiné napájecí RS, což zvyšuje spolehlivost dodávky EE a zkracuje dobu případného bezproudí.

Elektronické ochrany se umísťují pouze na vývody a přívody v RS. V případě poruchy na napájecí linii či některé z připojených dTS tedy dojde k odpojení celé této linie. Díky nastavení časové i proudové selektivity ochran, je zajištěno, že k tomu dojde v místě nejbližšího místu poruchy a rozsah bezproudí bude co nejmenší. Po lokalizaci a vyřazení poškozeného místa je síť zmanipulována tak, aby případným přerušením EE byl dotčen co nejmenší počet zákazníků. Není-li možné do stanovené doby obnovit dodávku energie odběratelům přes DS je provozovatel povinen zajistit náhradní zdroj EE (např. s využitím diesel-agregátu).

### 2.2.3. Síť NN

Svým rozsahem a množstvím jednotlivých uzlů se jedná o nesložitější část celé DS. Tvoří poslední článek soustavy, propojující NN část transformoven VN/0,4kV se zákazníky (převážně odběrateli, ale s rozvojem FVE se na této úrovni vyskytuje i stále se rozšiřující počet malých zdrojů EE). V současnosti je síť provozována hlavně paprskovým a průběžným způsobem, kdy jednotlivé napájecí linie tvoří vývody z NN rozváděče dTS a přes pojistkové skříně (RIS) jsou vedeny až do hlavních domovních rozváděčů u zákazníků. I když tato síť tvoří složitou mříž a v případě potřeby umožňuje celou řadu provozních přepojení, díky nimž může být EE vedena jinou cestou, až na výjimky se jako mřížová neprovozuje. Je to dáno hlavně přijatou koncepcí chránění, která je tvořena převážně pojistkami. Ty neumožňují směrové chránění a ztěžovaly by samotnou lokalizaci místa poruchy do doby než by počet poruch překročil kritickou hranici a došlo k rozsáhlému výpadku dodávky EE. Vzhledem k předpokládanému rozvoji „Smar-Grids“ (SG) je zřejmé, že přijatá koncepce chránění si v brzké době vyžádá změnu a tak se stále více objevují projekty, které ověřují možnosti nových technologií, u nichž jsou tyto nedostatky odstraněny (např. signalizují průchod zkratového proudu a hlásí přepálení pojistky i když díky mřížovému rozvodu je napětí na obou jejích koncích). Jejich hromadné nasazení si však vyžádá značné investice do komunikační infrastruktury a případné dovybavení technologie do dTS, kterých je velmi mnoho.

## 2.3. Kritéria přenosu elektrické energie

Je zřejmé, že v současné době není možné řešit požadavky na rostoucí přenos a kvalitu dodávky EE hromadnou výstavbou nových vedení. Nejen z pohledu majetkoprávního, kdy příprava projektu a uzavření všech potřebných dohod je záležitostí několika let, ale i z pohledu urbanistického a ekologického. Vzhledem k novým trendům a jejich dopadům na provoz PS či DS, nabývá požadavek na řízení výkonových toků v soustavě na stále větší důležitosti. Vlivem provozu velkých zdrojů obnovitelné energie (větrné a fotovoltické parky) dochází k mnohem větším a častějším výkyvům mezi spotřebou a dodávkou a s nimi spojených přetoků energie (nejen lokálním, ale i v rámci PS okolních států). To již nyní způsobuje celou řadu problémů a ohrožuje stabilitu přenosové sítě. Při současném tempu rozvoji bude stále těžší vyhovět vysokým požadavkům na kvalitu a spolehlivost dodávky a zdá se, že je jen otázkou času než dojde vlivem nepříznivých okolností ke zhroucení sítě. Proto je tak důležitá otázka dobré strategie, regulace a možnosti ovlivňovat výkonové toky.

Podle zdroje [5] omezují výkonové toky hlavně tyto základní kritéria:

- **Teplota** – v souvislosti s dlouhodobým nadměrným zatížením, náhlou změnou zapojení při poruše či výpadku nebo v souvislosti s nepříznivými okolními vlivy může

docházet k dlouhodobému či momentálnímu nadměrnému zahřívání prvků soustavy.

- **Řízení U a Q** – hodnotu napětí je třeba udržovat v předepsaných mezích, neboť s přepětím roste riziko přeskočení či průrazu izolačního systému. S podpětím se zhoršují funkce řady spotřebičů a roste proudové zatížení čímž, se zvyšují ztráty. Úroveň napětí je obvykle velmi citlivá na toky jalového výkonu. V ustáleném chodu je možné nízké napětí při velké zátěži korigovat kompenzací Q, naopak vysoké napětí při nízké spotřebě přepínáním odboček TR.
- **Řízení toku P** – rovnoměrnějším rozložením činného výkonu v soustavě lze docílit snížení ztrát, vytvoření rezerv u přenosových cest a efektivnějšího využití prvků soustavy.
- **Stabilita** – nejen napěťová, ale hlavně dynamická stabilita systému, díky níž je možné úspěšně přecházet mezi rozdílnými pracovními body.

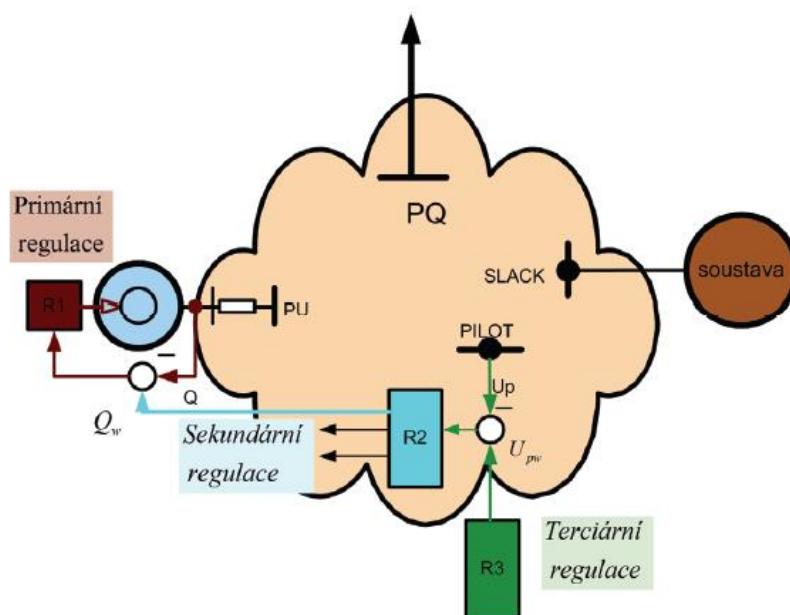
Všechna výše uvedená kritéria velmi úzce souvisí s dodržением kvality dodávky EE a s regulačními opatřeními, které se mohou dotýkat jak strany výroby a spotřeby, tak samotných prvků elektrizační soustavy.

### 3. REGULACE NAPĚTÍ

Parametry a hlavní charakteristiky veličin souvisejících s přenosem elektrické energie, popisuje řada technických norem a předpisů. Meze a hodnoty napětí, jaké lze za „normálních provozních podmínek“ očekávat ve veřejné distribuční soustavě na všech napěťových hladinách udává ČSN EN 50 160 [6]. Jak již bylo řečeno, k regulaci napětí dochází na všech stupních elektrizační soustavy a velmi úzce souvisí s regulací jalového výkonu.

Hlavním cílem regulace je zajištění kvality dodávky EE odběratelům. Dalším je snaha o snížení technických ztrát v provozované soustavě a s tím spojených nákladů. Jelikož napětí je na rozdíl od frekvence záležitostí lokálního charakteru, lze jeho regulaci provádět jak centrálně tak decentralizovaně v jednotlivých uzlech. Vybrané uzly, u nichž se napětí sleduje a řídí, se nazývají „pilotními uzly“. Hodnotu napětí lze měnit změnou hodnoty jalového výkonu (jak na straně spotřeby tak výroby, či prostřednictvím regulačních prvků soustavy) anebo přímou změnou převodu transformátorů pomocí jeho odboček.

Koncepce regulace napětí, je schematicky zobrazená na obrázku převzatém ze zdroje [7]:



Obr. 3: Hierarchická struktura řízení napětí [7]

Princip je založen na třístupňové hierarchii, která se skládá z regulace:

- **Primární** – na úrovni jednotlivých bloků výroby, udržuje zadanou hodnotu napětí na svorkách generátoru pomocí okamžité změny buzení stroje.
- **Sekundární** – na úrovni jednotlivých uzlů soustavy, kde automaticky zajišťuje rovnováhu spotřeby a výroby  $Q$ . Tato úloha je poměrně složitá a je založena na několika technologických procesech:

- Automatická regulace napětí (ARN)
- Skupinová regulace napětí (SRN)
- Sekundární regulace Q (SRQ)
- Regulace odboček TR

Zjednodušeně je možné říci, že ARN vyhodnotí aktuální stav a určí hodnotu Q, která je nutná pro eliminaci případné odchylky. Tento požadavek pak rozdělí na jednotlivé SRU, které mají v daném uzlu k dispozici potřebné rezervy. SQR generátorů pak provedou potřebné změny vedoucí ke změně hodnoty napětí primární regulace (PRN), která upraví velikost Q vstupujícího přes blokové TR zpět do soustavy.

- **Terciální** – na úrovni celé regulované soustavy, založená na snaze o korekci napětí v „pilotních uzlech“ pro bezpečný a ekonomický provoz soustavy. Tento proces je však zároveň omezoována několika podmínkami:
  - regulací toků jalového výkonu mezi soustavami jednotlivými PS nebo do DS
  - zachováním rezervní hodnoty jalového výkonu pro jednotlivé pilotní uzly
  - dodržení minimální a maximální hodnoty napětí

### 3.1. Regulace odboček transformátoru

Jak již bylo řečeno, jednou z možností jak napětí regulovat aniž by došlo k ovlivnění jalového výkonu, je přepínání odboček TR. V současné době je transformátor VVN/VN posledním prvkem DS, u kterého lze provádět regulaci napětí při zatížení. Na trhu jsou již sice dostupné i distribuční TR VN/NN, které také mají tuto schopnost, ale vzhledem k jejich ceně a životnosti současných TR, nelze jejich masivní nasazení ve střednědobém horizontu předpokládat.

Transformátory VVN/VN jsou většinou konstruovány s převodem  $110\text{kV} \pm 8 \times 2\% / \text{VN}$ , díky čemuž je možné za provozu převod dle potřeby měnit. K tomu většinou slouží automatický regulátor odboček, jehož hlavním úkolem je udržovat stabilní sekundární napětí výkonového TR. Existuje celá řada těchto přístrojů, se spoustou doplňkových funkcí, ale základní princip je vždy stejný. Automatika na základě měřeného napětí a proudu v pravidelných intervalech (řádově 100ms) vyhodnocuje, zda a jak se skutečná hodnota napětí odchyluje od hodnoty požadované. V případě, že  $\Delta U$  překročí zadané meze a jsou splněny ostatní potřebné podmínky, předá regulátor pohonu povel, na jehož základě dojde ke zvýšení či snížení odbočky transformátoru. Tento cyklus se může dle potřeby opakovat do té doby, než se měřená hodnota napětí vrátí do pásma tolerovaných hodnot nebo je z nějakých důvodů (většinou bezpečnostních) zablokován. Aby nedocházelo k příliš častým regulačním zásahům má regulace možnost proces zpozdít a povel k přepnutí dát až poté, kdy je napětí mimo zadané meze déle (cca jednotky minut). V případě, že mezitím dojde k návratu do

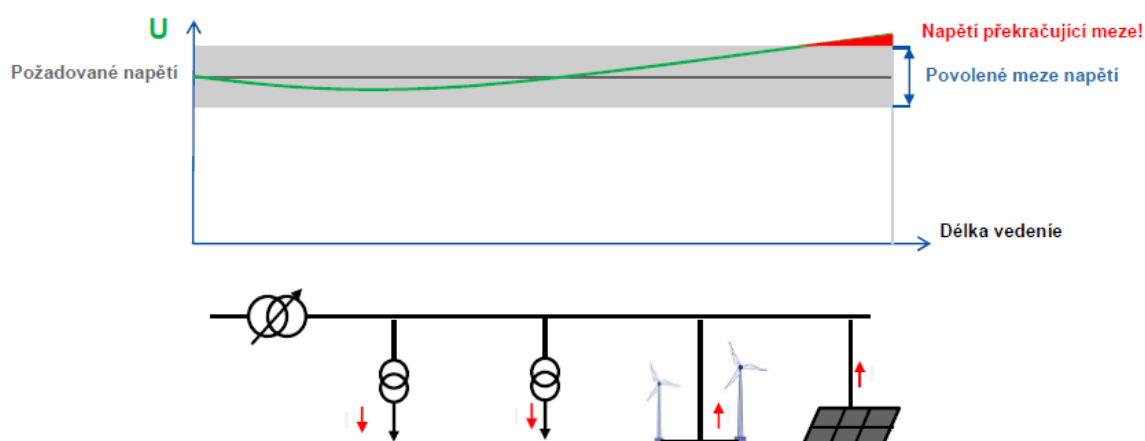
stanovených mezí, je doba vynulována a odpočet začne znovu od nuly. Ačkoliv je celý proces plně automatizovaný, většina regulátorů umožňuje rovněž ruční ovládání pro potřeby místní obsluhy transformovny.

### 3.1.1. Regulátory v PREDi

Ve společnost PREDi se nejčastěji využívají regulátory HRT (Orgrez), SPAU (ABB) a MK30 (MR Reinhausen) které jsou mnohdy dodány i s příslušným pohonem jako samostatný součást výkonového TR. Díky tomu je možné provádět na regulátoru a samotném přepínači odboček revize bez nutnosti zásahu do nádoby transformátoru. Z materiálů [8], [9] a [10] lze vyčíst, že u všech uvedených regulátorů je třeba pro správnou funkci nastavit technologické konstanty, které přímo ovlivňují výpočetní algoritmus. Jedná se hlavně o:

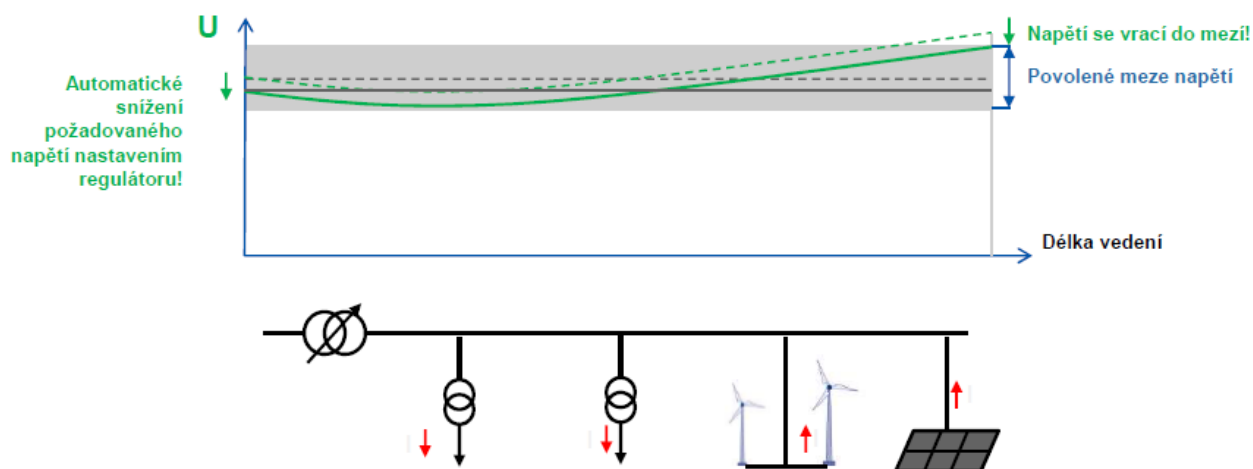
- **Požadované napětí** = nastavená hodnota  $U$  (záhladní nastavení regulace) pohybující se v rozsahu 85 až 120%  $U_n$ .
- **Necitlivost** = hodnota v %, určující pásmo v jakém se může lišit požadovaná hodnota  $U$  od skutečného měřeného napětí. Je-li hodnota v uvedeném rozsahu, pak k regulaci nedojde (hodnota necitlivosti musí být vždy větší, než je hodnota regulačního stupně TR).
- **Časové pásmo** = hodnota ovlivňující výpočet čítače zpoždění (doba čekání na skutečnou regulaci).
- **Zpoždění** = hodnota v % udávající o kolik se může lišit požadovaná hodnota napětí od skutečného měřeného napětí, aniž dojde k okamžitému regulačnímu zásahu.
- **Nadproudové blokování** = násobek nominálního proudu, při kterém je nežádoucí, aby došlo k regulačnímu zásahu, neboť i když nadproud není dost vysoký na to, aby zafungovaly ochrany v rozvodně, mohl by způsobit poškození regulátoru či spíše přepínače odboček.
- **Přepětí** = hodnota přepětí ochrany, kterou měřená hodnota napětí nemůže překročit. V případě, že se tak stane, dojde automaticky k regulaci za účelem snížení napětí.
- **Podpětí** = hodnota určující dolní hranice měřeného napětí. V případě překročení dojde automaticky k odblokování regulátoru a regulaci za účelem zvýšení  $U$ .
- **Proudová korekce** = hodnota, o kterou je v případě jejího použití navýšena hladina požadovaného napětí. Hodnota může být také korigována v závislosti na skutečně měřeném proud. Korekce slouží ke kompenzaci úbytku napětí na vedení a provádí se vektorové sčítání měřeného proudu a napětí. Proto je nutno stanovit z kterých fází se bude odebírat napětí a ze které fáze proud (přivede-li se sdružené napětí  $U_{12}$  musí se připojit proud  $I_2$  a to v takové orientaci, aby napětí TR při vzrůstajícím  $I$  stoupalo).
- **Odblokování** = doba v sekundách, po kterou je automat zablokován.

Zbývající funkce se v současnosti využívají jen ojediněle. Kromě samotné proudové korekce, která umožňuje kompenzaci úbytku napětí na vedení, je velmi zajímavá možnost, s níž jsem se setkal v prezentaci firmy MR uvedené mezi zdroji pod číslem [13]. Ta velmi elegantním způsobem umožňuje eliminaci negativních dopadů narůstajícího počtu OZE, které mohou způsobovat, že na některých vedeních nepřekračuje  $\Delta U$  spodní mez povolené hodnoty napětí ale naopak tu horní.



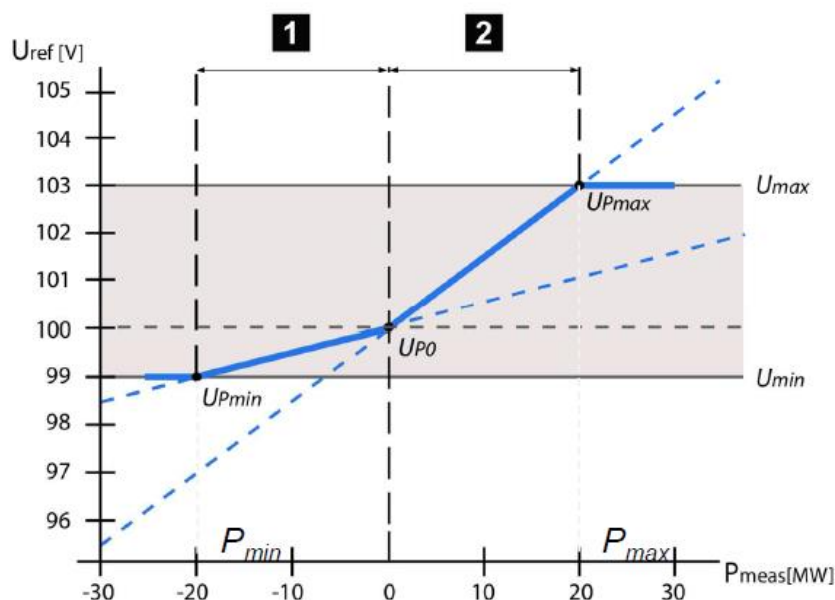
Obr. 4: Možný negativní dopad OZE na kvalitu dodávky napětí [13]

Řešení, které MR pro tyto případy nabízí, spočívá v tom, že v okamžiku kdy se na TR změní tok výkonu a výroba bude větší než zatížení, napěťový regulátor sníží požadovanou hodnotu napětí. V důsledku toho dojde ke snížení napětí na celé délce linky a napětí se vrátí do povolených mezí, tak jak je vidět na následujícím obrázku.



Obr. 5: Eliminace napětí překračujícího maximální povolenou mez [13]

Tohoto efektu je docíleno tím, že automatika této firmy umožňuje nastavení požadované hodnoty v závislosti na měřeném činném výkonu, jak je to zobrazeno na posledním obrázku převzatém z tohoto zdroje [13]



Obr. 6: Rozdílné meze povolené hodnoty  $U$  v závislosti na toku výkonu [13]

Jak je vidět, v závislosti na tom zda je aktuální činný výkon kladný nebo záporný (dodávka / spotřeba) mění se příslušné regulační meze  $U_{min}$  a  $U_{max}$ .

Alternativou k uvedeným HW regulátorům napětí je SW úloha sestavená přímo v řídicím systému (ŘS) dané rozvodny. Tento přístup se však z důvodu závislost na funkci ŘS, nevyužívá a dává se přednost autonomně pracujícím jednotkám.

Hodnoty, na něž se v PREDi technologické konstanty regulátorů nastavují nejčastěji, jsou:

- hladina napětí 102%  $U_n$  (výjimečně 101%  $U_n$ )
- necitlivost 1,2%  $U_n$
- zpoždění 180s (výjimečně 120 nebo 300s)
- nadproud 1,1  $I_n$  (velmi ojediněle 1,0 nebo 1,2  $I_n$ )
- přepětí 1,1  $U_n$  (ojediněle 1,05 nebo 1,15  $U_n$ )
- podpětí 0,85  $U_n$

Na závěr této kapitoly přikládám ještě tabulku s počty hlášení týkajících se regulátorů TR, zaznamenaných v dispečerském deníku (DD) za celý rok 2014. Analýzou těchto dat (za vybrané R 110/22) jsem získal představu o průměrných počtech regulačních zásahů:



Rozvodna / trafo:	měsíc:												Průměr za den
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	
<b>BECHOVICE</b>	<b>416</b>	<b>320</b>	<b>270</b>	<b>450</b>	<b>502</b>	<b>566</b>	<b>672</b>	<b>572</b>	<b>468</b>	<b>356</b>	<b>420</b>	<b>570</b>	<b>15</b>
T101	120	72	32	84	86	162	176	156	108	52	80	142	3
T102	208	168	152	240	246	218	280	232	196	196	212	242	7
T103	88	80	86	126	170	186	216	184	164	108	128	186	5
<b>CERNY_MOST</b>	<b>466</b>	<b>436</b>	<b>348</b>	<b>406</b>	<b>404</b>	<b>718</b>	<b>766</b>	<b>658</b>	<b>582</b>	<b>528</b>	<b>674</b>	<b>554</b>	<b>18</b>
T101	206	196	168	250	244	350	324	264	228	80	260	240	8
T102	260	240	180	156	160	368	442	394	354	448	414	314	10
<b>CERVENY_VRCH</b>	<b>118</b>	<b>132</b>	<b>70</b>	<b>72</b>	<b>52</b>	<b>144</b>	<b>240</b>	<b>57</b>	<b>100</b>	<b>96</b>	<b>72</b>	<b>44</b>	<b>3</b>
T101	30	48	4	12		82	122	25	36	24	20	12	1
T102	88	84	66	60	52	62	118	32	64	72	52	32	2
<b>HOLESOVICE</b>	<b>396</b>	<b>292</b>	<b>252</b>	<b>272</b>	<b>282</b>	<b>442</b>	<b>520</b>	<b>290</b>	<b>336</b>	<b>296</b>	<b>390</b>	<b>440</b>	<b>12</b>
T101	62	24	12	12	34	98	106	52	48	52	112	130	2
T102	118	80	54	64	60	102	138	64	72	60	88	134	3
T103	92	80	86	80	72	110	130	68	104	76	76	84	3
T104	124	108	100	116	116	132	146	106	112	108	114	92	4
<b>CHODOV</b>	<b>118</b>	<b>108</b>	<b>124</b>	<b>154</b>	<b>176</b>	<b>230</b>	<b>356</b>	<b>212</b>	<b>298</b>	<b>368</b>	<b>332</b>	<b>280</b>	<b>8</b>
T101									108	124	100	104	1
T102	118	108	124	154	58	128	156	52	88	124	116	96	4
T103					118	102	200	160	102	120	116	80	3
<b>KARLOV</b>	<b>380</b>	<b>300</b>	<b>324</b>	<b>156</b>	<b>152</b>	<b>132</b>	<b>228</b>	<b>136</b>	<b>292</b>	<b>240</b>	<b>320</b>	<b>344</b>	<b>8</b>
T101	206	164	168	90	80	76	124	80	162	126	160	172	4
T102	174	136	156	66	72	56	104	56	130	114	160	172	4
<b>LETNANY</b>	<b>340</b>	<b>258</b>	<b>276</b>	<b>378</b>	<b>432</b>	<b>468</b>	<b>428</b>	<b>390</b>	<b>310</b>	<b>404</b>	<b>396</b>	<b>284</b>	<b>12</b>
T101	198	154	158	218	154	234	172	164	136	180	184	128	6
T103	142	104	118	160	278	234	256	226	174	224	212	156	6
<b>LHOTKA</b>	<b>492</b>	<b>128</b>	<b>316</b>	<b>260</b>	<b>116</b>	<b>208</b>	<b>406</b>	<b>466</b>	<b>212</b>	<b>360</b>	<b>312</b>	<b>272</b>	<b>10</b>
T101	206	8	62	98	44	94	138	156	56	116	110	94	3
T102	72	80	92	48	12		128	144	64	132	94	74	3
T103	214	40	162	114	60	114	140	166	92	112	108	104	4
<b>MALESICE</b>	<b>724</b>	<b>596</b>	<b>486</b>	<b>676</b>	<b>484</b>	<b>696</b>	<b>940</b>	<b>902</b>	<b>922</b>	<b>1054</b>	<b>802</b>	<b>678</b>	<b>25</b>
T101	156	140	156	168	102	152	266	270	242	292	196	152	6
T102	350	264	182	244	222	292	404	368	400	418	386	318	11
T103	218	192	148	264	160	252	270	264	280	344	220	208	8
<b>PANKRAC</b>	<b>158</b>	<b>218</b>	<b>208</b>	<b>202</b>	<b>234</b>	<b>208</b>	<b>272</b>	<b>216</b>	<b>192</b>	<b>198</b>	<b>212</b>	<b>216</b>	<b>7</b>
T101	98	106	100	102	114	100	128	100	86	82	100	104	3
T102	60	112	108	100	120	108	144	116	106	116	112	112	4
<b>SEVER</b>	<b>262</b>	<b>214</b>	<b>200</b>	<b>228</b>	<b>224</b>	<b>232</b>	<b>276</b>	<b>210</b>	<b>202</b>	<b>194</b>	<b>284</b>	<b>282</b>	<b>8</b>
T101	126	126	148	180	160	122	158	132	122	122	136	128	5
T102	136	88	52	48	64	110	118	78	80	72	148	154	3
<b>SMICHOV</b>	<b>118</b>	<b>132</b>	<b>104</b>	<b>132</b>	<b>156</b>	<b>152</b>	<b>232</b>	<b>152</b>	<b>136</b>	<b>156</b>	<b>160</b>	<b>148</b>	<b>5</b>
T101	36	48	14	44	68	68	108	52	44	72	52	64	2
T102	82	84	90	88	88	84	124	100	92	84	108	84	3
<b>STRED</b>	<b>796</b>	<b>670</b>	<b>580</b>	<b>704</b>	<b>658</b>	<b>706</b>	<b>762</b>	<b>624</b>	<b>692</b>	<b>710</b>	<b>752</b>	<b>798</b>	<b>23</b>
T101	152	116	96	188	256	262	340	310	302	280	204	198	7
T102	208	196	142	52						62	158	200	3
T103	238	192	184	220	190	216	222	162	186	176	196	210	7
T104	198	166	158	244	212	228	200	152	204	192	194	190	6
<b>Celkem za rok:</b>	<b>4784</b>	<b>3804</b>	<b>3558</b>	<b>4090</b>	<b>3872</b>	<b>4902</b>	<b>6098</b>	<b>4885</b>	<b>4742</b>	<b>4960</b>	<b>5126</b>	<b>4910</b>	<b>153</b>

Obr. 7: Tabulka s počty záznamů v DD, týkajících se regulace odbočky TR 110/22kV [15]

## 4. TRANSFORMÁTORY

*Teoretické znalosti, uvedené v následující kapitole jsou popsány v řadě odborných publikací a elektrotechnických skriptech. Ačkoliv zde vždy neuvádím doslovné citace, čerpám většinu informací v celé této kapitole ze zdrojů [2], [11] a [12], kde je potřebná problematika popsána z různých úhlů pohledu a do různé hloubky.*

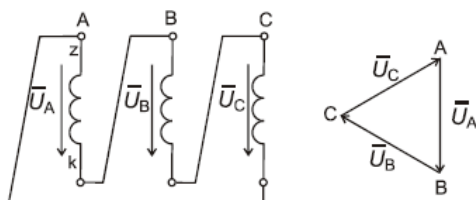
**Transformátor** je netočivý elektrický stroj, který pomocí střídavého magnetického pole přenáší elektrickou energii mezi dvěma nebo více střídavými obvody. Tyto stroje lze dále dělit podle celé řady kritérií, které většinou souvisí s konstrukčním uspořádáním, vlastnostmi či způsobem jejich užití. Nejčastěji se dělí podle těchto kritérií:

- **převod** - zvyšovací // snižovací // oddělovací,
- **soustava** - jednofázové // vícefázové (obvykle 3f.),
- **vinutí** - dvouvinutové // trojvinutové // autotransformátory (vzhledem ke specifickým vlastnostem a konstrukci tvoří zcela zvláštní skupinu),
- **účelu využití** - blokové // distribuční // průmyslové // trakční // izolační // spojovací // pro vlastní spotřebu atd.

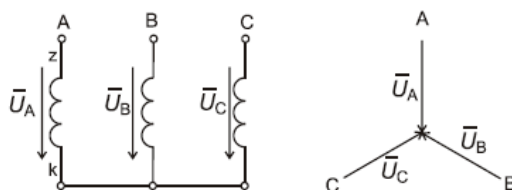
Vstupní i výstupní vinutí 3f. transformátorů lze spojit několika různými způsoby (trojúhelník, hvězda, lomená hvězda) jenž ovlivňují další vlastnosti či způsoby využití. Pro rozlišení jak je vinutí zapojeno, se používá písmenné značení - pro vyšší napětí ("primární strana TR") se využívají velká písmena (D, Y, Z), pro nižší napětí ("sekundární strana TR") malá (d, y, z).

Výhody zapojení vinutí do trojúhelníku, spočívají hlavně ve větší hospodárnosti při nižších hodnotách napětí a velkých proudech, případně ve zmenšení netočivé impedance tohoto vinutí (při kombinaci s lomenou hvězdou). Zapojení vinutí do hvězdy pak umožňuje využití nulového bodu vinutí (N, n) a jeho přímého, či nepřímého uzemnění. Je hospodárnější pro vyšší hodnoty napětí a umožňuje umístit odbočky vinutí a jejich přepínače u konce vinutí každé fáze, což je mnohem výhodnější. Zvláštním druhem zapojení vinutí je lomená hvězda kdy se každá fáze vinutí skládá ze dvou částí umístěných na různých sloupcích jádra TR. To způsobí, že napětí v obou částech vinutí je vůči sobě fázově posunuté. Pro dosažení stejné hodnoty napětí jako je u normální hvězdy je sice potřeba o cca 15% více závitů, ale toto zapojení má ohromnou výhodu v tom, že zmenšuje nerovnost napětí v soustavách s nerovnoměrným zatížením jednotlivých fází.

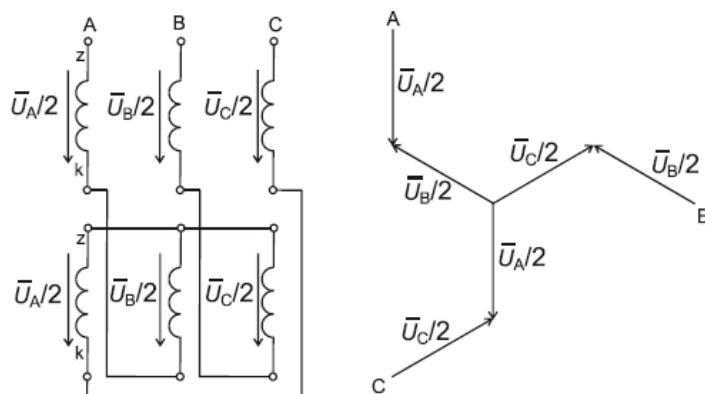
Příklady zapojení vinutí TR do trojúhelníku (D), hvězdy (Y) a lomené hvězdy (Z) včetně fázorových diagramu, jsou vidět na následujících třech obrázcích převzatých ze zdroje [2]:



Obr. 8: Ukázka spojeného vinutí TR do trojúhelníka a fázorového diagramu napětí [2]

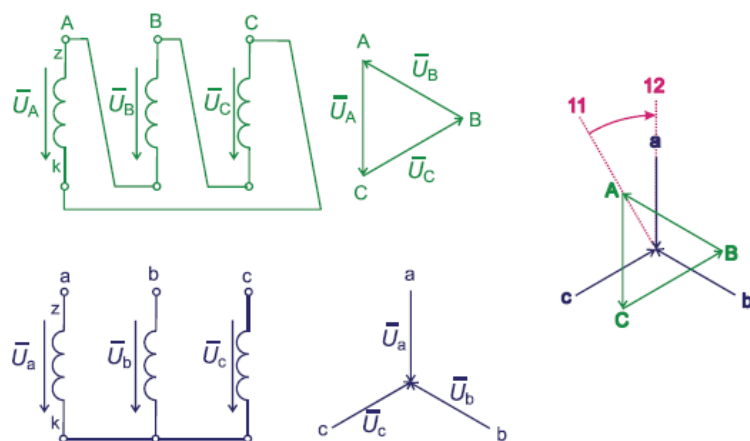


Obr. 9: Ukázka spojení vinutí TR do hvězdy a fázorového diagramu napětí [2]

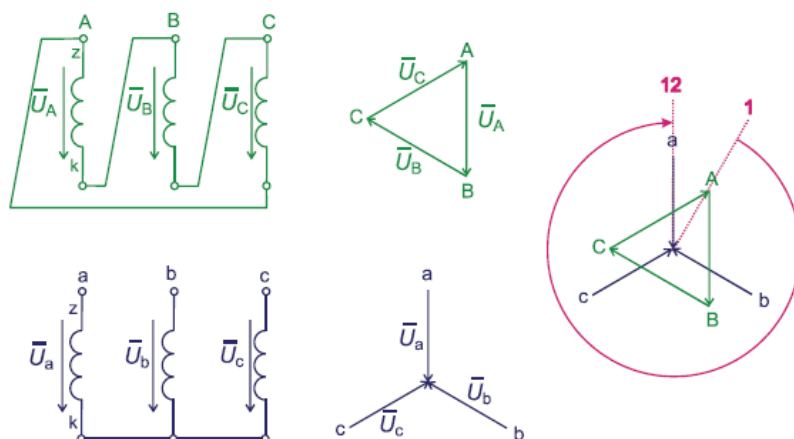


Obr. 10: Ukázka spojení vinutí TR do lomené hvězdy a fázorového diagramu napětí [2]

Se samotným zapojením vinutí transformátoru velmi úzce souvisí rovněž pojem "**hodinový úhel**". Ten vyjadřuje posun fázového napětí sekundární strany TR proti fázovému napětí na straně primární. Úhel se uvažuje vždy ve směru hodinových ručiček a vyjadřuje se celými čísly, jenž představují násobky  $30^\circ$ . Pro lepší pochopení pojmu využijí následující dva obrázky, uvedené ve zdroji [2]. Na nich jsou zobrazeny dva, podle uvedeného zdroje nejčastější, způsoby zapojení distribučních transformátorů VN/NN, těmi by mělo být zapojení Dy1 a Dy11:



Obr. 11: Ukázka zapojení transformátoru Dy s hodinovým úhlem 1 [2]



Obr. 12: Ukázka zapojení transformátoru Dy s hodinovým úhlem 11 [2]

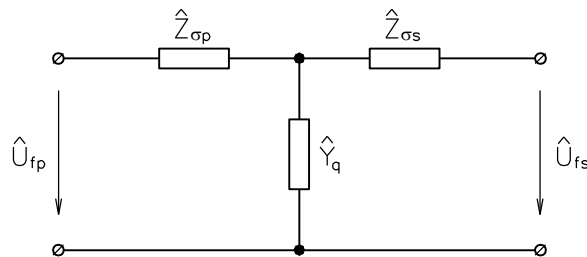
## 4.1. Náhradní schéma transformátoru

Tato problematika je popsána ve všech třech zdrojích, které jsem na začátku kapitoly 4 uvedl. Asi nejrozsáhleji je zpracována ve skriptech docenta F. Němečka [11]. Pro účely této práce, však postačí i stručnější popis uvedený ve zdroji [12], který, až na drobné úpravy týkající se číslování obrázků, cituji doslovně:

### 4.1.1. Dvojvinutové transformátory

Při zanedbání případných nesouměrností v prostorovém uspořádání fází lze uvážit každou fázi zvlášť. Obvykle používáme náhradní schéma ve tvaru T článku, kde jednotlivé veličiny jsou buď pojmenované a přepočtené na jedno jmenovité napětí, nebo hodnoty

poměrné, vztažené na jmenovitý výkon a jmenovité napětí stroje. Primární veličiny se opatřují indexem **p**, sekundární indexem **s**.



Obr. 13: Náhradní schéma "dvojvinutového" transformátoru ve tvaru T článku [12]

Rozptylnou impedanci primárního vinutí  $\hat{Z}_{\sigma p} = R_p + j \cdot X_{\sigma p}$  tvoří rezistance primárního vinutí  $R_p$  a rozptylná reaktance primárního vinutí  $X_{\sigma p}$ ,  $\hat{Z}_{\sigma s} = R_s + j \cdot X_{\sigma s}$  je rozptylná impedance sekundárního vinutí a  $\hat{Y}_q = G_q - j \cdot B_q$  je příčná admitance.

Hodnoty jednotlivých veličin se zjistí výpočtem a ověřují na hotovém výrobku zkouškou naprázdno a nakrátko. Tyto zkoušky poskytnou následující hodnoty:  $\Delta P_0$  (W) ztráty činného výkonu naprázdno,  $I_{0\%}$  proud naprázdno v procentech jmenovitého proudu,  $\Delta P_k$  (W) ztráty činného výkonu nakrátko,  $z_{k\%} = u_{k\%}$  impedanci (napětí) nakrátko, vyjádřené v procentech příslušné jmenovité veličiny.

Pro příčnou admitanci  $\hat{y}_q$  a její složky v poměrných hodnotách (vztažených na jmenovitý zdánlivý výkon  $S_{nom}$  a jmenovité napětí  $U_{nom}$ ) platí:

$$g_q = \frac{\Delta P_0}{S_{nom}}, \quad y_q = \frac{I_{0\%}}{100}, \quad b_q = \sqrt{y_q^2 - g_q^2}$$

$$\hat{y}_q = \frac{\Delta P_0}{S_{nom}} - j \sqrt{\left(\frac{I_{0\%}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_0}{S_{nom}}\right)^2} = g_q - j b_q$$

Pro podélnou impedanci  $\hat{z}_k$  v poměrných hodnotách a její složky platí:

$$r_k = \frac{\Delta P_k}{S_{nom}}, \quad z_k = \frac{u_{k\%}}{100}, \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}$$

$$\hat{z}_k = \frac{\Delta P_k}{S_{nom}} + j \sqrt{\left(\frac{u_{k\%}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_k}{S_{nom}}\right)^2} = r_k + j x_k$$

Pro převod admitance a impedance v poměrných hodnotách na veličiny pojmenované se používají následující převodní vztahy:

$$\hat{Y}_q = \hat{y}_q \frac{S_{nom}}{U_{nom}^2} = G_q - j B_q \quad \hat{Z}_k = \hat{z}_k \frac{U_{nom}^2}{S_{nom}} = R_k + j X_k$$

Impedance  $\hat{Z}_k = (R_p + R_s) + j \cdot (X_{\sigma p} + X_{\sigma s})$  se rozkládá na dvě části tak, že se klade:

$$\hat{Z}_{\sigma p} = 0,5 \cdot \hat{Z}_k = \hat{Z}_{\sigma s}$$

Toto rozdělení není ovšem fyzikálně bezvadné, neboť rozptily obou vinutí nejsou vzhledem k uložení vůči kostře stejné.

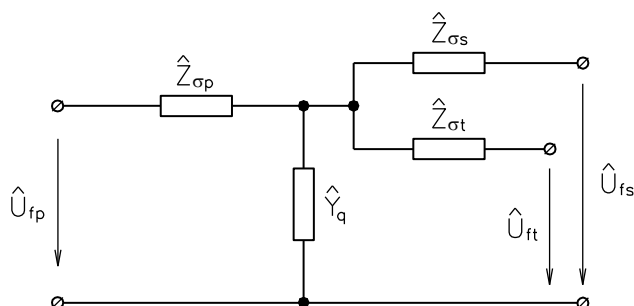
Pozn.: Obdobně jako u vedení mají při zkratových výpočtech hlavní smysl podélné prvky náhradního schématu, příčná admitance je zanedbatelná.

Jako obvyklé distribuční transformátory pro napájení sítě nízkého napětí se používají transformátory se spojením vinutí **Dyn**, které dobře snáší nesouměrné zatížení. Transformátory **Yzn** jsou vhodné a často používané tam, kde je třeba počítat s nesouměrným, případně s jednofázovým zatížením. Transformátory **Yd** jsou obvyklé v elektrárně jako blokové, kde vinutí do **d** je na straně alternátoru.

## 4.1.2. Trojvinutové transformátory

Trojvinutové transformátory jsou netočivé stroje se třemi vinutími na fázi.

Náhradní schéma se obvykle udává v následujícím tvaru:



Obr. 14: Náhradní schéma "trojvinutového" transformátoru [12]

Pro označení jednotlivých vinutí jsou použity indexy **p**, **s**, **t**.

Předpokládá se, že všechna vinutí téže fáze jsou vázána tímž společným magnetickým tokem. Jako u dvojvinuťových transformátorů se parametry potřebné k sestavení náhradního schématu určí výpočtem při návrhu a ověří se zkouškami na hotovém výrobku. Při zkoušce naprázdno se určí ztráty činného výkonu naprázdno  $\Delta P_0$  a proud naprázdno  $I_{0\%}$  v procentech jmenovitého proudu napájeného vinutí.

Zkoušky nakrátko jsou tři. Při nich se jedno vinutí napájí, jedno ze zbývajících je nakrátko, druhé ponecháno naprázdno. Poněvadž jmenovité výkony jednotlivých vinutí nemusí být stejné, uskuteční se měření nakrátko při proudu odpovídajícím jmenovitému proudu vinutí s menším výkonem a poté se přepočte na největší jmenovitý výkon, který se v transformátoru vyskytuje. Vinutí s největším jmenovitým výkonem se označuje jako primární. Za terciální se uvažuje vinutí s nejmenším jmenovitým výkonem.

Při zkoušce naprázdno se zpravidla napájí primární vinutí. Ze ztrát naprázdno a proudu naprázdno v procentech jmenovitého proudu zjistíme analogicky jako pro dvojvinuťový transformátor příčnou admitanci a její složky v poměrných hodnotách, vztažených na jmenovitý výkon  $S_{pnom}$  a jmenovité napětí primáru  $U_{pnom}$ :

$$\hat{y}_q = g_q - j b_q = \frac{\Delta P_0}{S_{pnom}} - j \sqrt{\left(\frac{I_{0\%}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_0}{S_{pnom}}\right)^2}$$

$$\hat{Y}_q = \hat{y}_q \frac{S_{pnom}}{U_{pnom}^2} = G_q - j B_q$$

U zkoušky nakrátko změříme ztráty nakrátko a napětí nakrátko pro jednotlivé dvojice vinutí. Z těchto naměřených hodnot podobně jako u dvojvinuťového transformátoru stanovíme hodnoty podélných impedancí  $\hat{Z}_{ps}$ ,  $\hat{Z}_{pt}$ ,  $\hat{Z}_{st}$ , ovšem je nutné tyto impedance vztáhnout na jmenovitý výkon  $S_{pnom}$  a napětí  $U_{pnom}$  primárního vinutí.

Například z měření nakrátko mezi vinutími **s-t** vypočteme:

$$\hat{z}_{st} = r_{st} + j x_{st} =$$

$$= \frac{\Delta P_{kst}}{S_{tnom}^2} \cdot S_{pnom} + j \sqrt{\left(\frac{u_{kst\%}}{100} \cdot \frac{S_{pnom}}{S_{tnom}}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{kst}}{S_{tnom}^2} \cdot S_{pnom}\right)^2}$$

$$\begin{aligned}\hat{Z}_{st} &= R_{st} + j X_{st} = \\ &= \frac{\Delta P_{kst}}{S_{inom}^2} \cdot U_{pnom}^2 + j \sqrt{\left( \frac{u_{kst\%}}{100} \cdot \frac{U_{pnom}^2}{S_{inom}} \right)^2 - \left( \frac{\Delta P_{kst}}{S_{inom}^2} \cdot U_{pnom}^2 \right)^2}\end{aligned}$$

Obdobné vztahy platí pro impedance  $\hat{Z}_{ps}$ ,  $\hat{Z}_{pt}$ , resp.  $\hat{Z}_{ps}$ ,  $\hat{Z}_{pt}$ .

Znalost impedancí nakrátko umožňuje stanovit rezistance a rozptylné reaktance jednotlivých vinutí, které jsou složkami rozptylné impedance:

$$\begin{aligned}\hat{Z}_{\sigma p} &= R_p + j \cdot X_{\sigma p} = 0,5 \cdot (\hat{Z}_{ps} + \hat{Z}_{pt} - \hat{Z}_{st}) \\ \hat{Z}_{\sigma s} &= R_s + j \cdot X_{\sigma s} = 0,5 \cdot (\hat{Z}_{ps} + \hat{Z}_{st} - \hat{Z}_{pt}) \\ \hat{Z}_{\sigma t} &= R_t + j \cdot X_{\sigma t} = 0,5 \cdot (\hat{Z}_{pt} + \hat{Z}_{st} - \hat{Z}_{ps})\end{aligned}$$

Rozptylné impedance  $\hat{Z}_{\sigma s}$ ,  $\hat{Z}_{\sigma s}$ ,  $\hat{Z}_{\sigma t}$  a příčná admitance  $\hat{Y}_q$  jsou prvky náhradního schématu, který umožňuje studovat napěťové a výkonové poměry trojvinutových transformátorů.

Vedle jmenovitých výkonů jednotlivých vinutí se používá ještě termín „typový výkon“  $S_{typ} = 0,5 \cdot (S_{pnom} + S_{snom} + S_{tnom})$ . Dvojvinutový transformátor se stejným jmenovitým výkonem jako je typový výkon trojvinutového transformátoru má přibližně stejné rozměry a váhu. Nejvyšší napětí trojvinutového a vyšší napětí dvojvinutového transformátoru se předpokládají stejné.

## 4.2. Parametry transformátorů

Ačkoliv výkonové TR jsou vyráběny typově stejně, mohou se v určitých parametrech mezi sebou nepatrně lišit. Při řadě výpočtů a provozních analýz souvisejících s distribucí EE či chodem elektrizační soustavy narazíme na potřebu znát tyto parametry. Na některé z nich jsme již narazili v předchozích dvou kapitolách týkajících se náhradních schémat TR. Proto zde ty nejdůležitější uvádím a stručně vysvětluji:

### 4.2.1. Výkon

Jedná se o základní parametr, který je třeba znát už při výběru TR ještě před jeho koupí (či spíše objednáním výroby). Jmenovitý výkon v podstatě udává zdánlivý výkon vstupující do



TR a vyjadřuje tak jeho trvalou zatížitelnost. Vlivem ztrát je hodnota výkonu na straně výstupu nižší. Ačkoliv je po technické stránce možné vyrábět TR v podstatě s libovolným výkonem (limity jsou určeny hlavně mechanickou pevností použitých materiálů, možností dopravy a usazení stroje u zákazníka a s tím spojenou cenou), vyrábí se většina velkých TR unifikovaně v typových řadách.

V distribuční síti PREDi se můžeme setkat s transformátory 400, 630 a 1000kVA na hladině VN a transformátory 25, 40 a 63MVA s terciálním vinutím na hladině VVN. V nadřazené soustavě se mohou vyskytovat i MVA TR s výkonem 10x větším - tyto velké stoje, se mnohdy skládají ze tří samostatných jednofázových transformátorů zapojených a provozovaných jako jeden třífázový transformátor.

### **4.2.2. Převod**

Tento parametr je dán poměrem závitů na vstupní straně (vyšší napěťová hladina) k počtu závitů na výstupní (nižší napěťová hladina). Převod jako takový je vyjádřen bezrozměrným údajem vypočtený z poměru napětí nikoliv samotného počtu závitů obou vinutí.

Většina distribučních TR VVN/VN je zkonstruována tak, že umožňují změnu převodu při zatížení. To je umožněno díky realizaci odboček vinutí na straně VVN (z důvodu menších proudů) mezi nimiž lze přepínat. Jmenovitý převod je uváděn pro nultou odbočku, od té je vyvedeno nejčastěji 8 dalších odboček na obě strany. Každá z těchto odboček představuje změnu napětí primární strany o 2% hodnoty nominálního napětí strany sekundární. Vzhledem k tomu, že převod je definován při stavu naprázdno, je při provozu TR výstupní hodnota napětí o něco menší, než je uváděna.

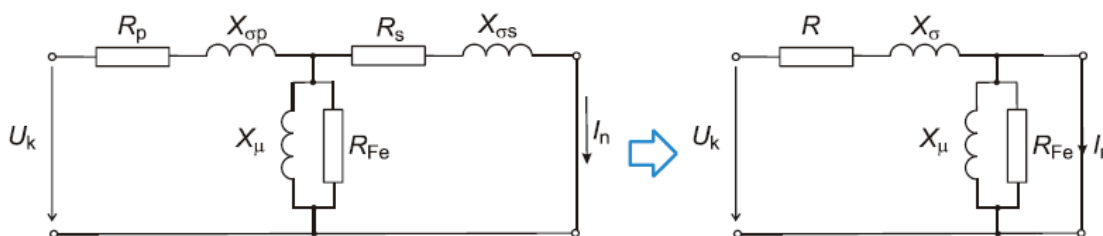
Rovněž distribuční TR VN/NN se řeší většinou jako regulační - nejčastěji s dvěma odbočkami 2,5% na obě strany od odbočky nulté. Tyto odbočky je však možné přepínat pouze za vypnutého stavu bez zatížení. I když i zde se již objevují speciální TR, které umožňují přepínání odboček při zatížení, stejně jako je tomu na hladině VVN. Jedná se o speciální TR různých výrobců, které se souhrnně označují zkratkou OLCD (On-Load Tap-Changers).

### **4.2.3. Ztráty**

Dělí se do dvou hlavních skupin, na ztráty v železe a ztráty ve vinutí. Ztráty v železe se označují jako ztráty naprázdno ( $\Delta P_0$ ) a vznikají změnou magnetického toku, bez které by TR nemohl fungovat. Tyto ztráty jsou při konstantní frekvenci přímo úměrné velikosti napětí - z toho důvodu se téměř nemění a jsou nezávislé na zatížení TR. Opačná situace platí u ztrát ve vinutí, které se označují jako ztráty nakrátko ( $\Delta P_k$ ). Vznikají průchodem proudu vinutími a tím pádem se s rostoucím zatížením TR kvadraticky zvyšují.

#### 4.2.4. Napětí nakrátko

Zjednodušeně jde říct, že se jedná o procentně vyjádřenou hodnotu vstupního napětí (v procentech nominálního vstupního napětí), při které je velikost proudu protékajícího zkratovaným výstupním vynutím rovna nominálnímu výstupnímu proudu. Tímto způsobem je možné snadno odvodit, jaké hodnoty by dosáhl zkratový proud na výstupu, aniž by při měření došlo k poškození výstupního vinutí TR. V poměrných hodnotách je napětí nakrátko přibližně rovno (zanedbává-li se proud příčnou admitancí) podélné impedanci transformátoru. Podle [2] je vhodnější náhradní schéma ve tvaru "T článku" zjednodušit na vhodnější "gama" článek, pro který pak platí  $R = R_p + R_s$  a  $X_\sigma = X_{\sigma p} + X_{\sigma s}$  tak jak je vidět na následujícím obrázku převzatém ze stejného zdroje:



Obr. 15: Zjednodušené náhradní schéma transformátoru "nakrátko" [2]

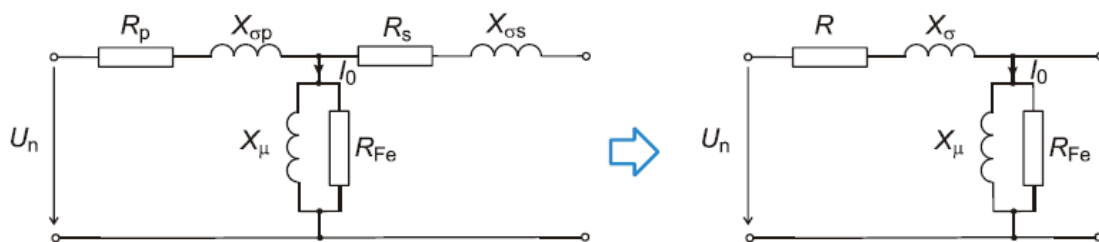
$$u_k = \frac{\sqrt{3}U_k}{U_n} = \frac{\sqrt{R^2 + X_\sigma^2}}{U_n} \sqrt{3}I_n = \frac{\sqrt{R^2 + X_\sigma^2}}{Z_n} = \sqrt{r^2 + x^2} = z$$

přičemž  $r = \frac{R}{Z_n} = \frac{\sqrt{3}I_n}{U_n} R = \frac{3I_n^2 R}{\sqrt{3}I_n U_n} = \frac{\Delta P_k}{S_n}$  je poměrná hodnota odporu vinutí TR a

$x = \frac{X_\sigma}{Z_n} = \frac{I_n}{\sqrt{3}U_n} X_\sigma = \frac{3I_n^2 R}{\sqrt{3}I_n U_n} = \sqrt{z^2 - r^2}$  poměrná hodnota rozptylové reaktance TR.

#### 4.2.5. Proud naprázdno

Rovněž tato hodnota je udávána v procentech a jedná se o velikost proudu procházejícího TR při rozpojené výstupní straně a nominálním napětí na straně vstupní. V poměrných hodnotách (při zanedbání úbytku napětí na podélné impedanci) platí rovnost mezi tímto proudem a příčnou admitancí. Podle stejného zdroje [2] jako v předchozím případě, lze náhradní schéma z T článku zjednodušit na článek gama:



Obr. 16: Zjednodušené náhradní schéma transformátoru "naprázdno" [2]

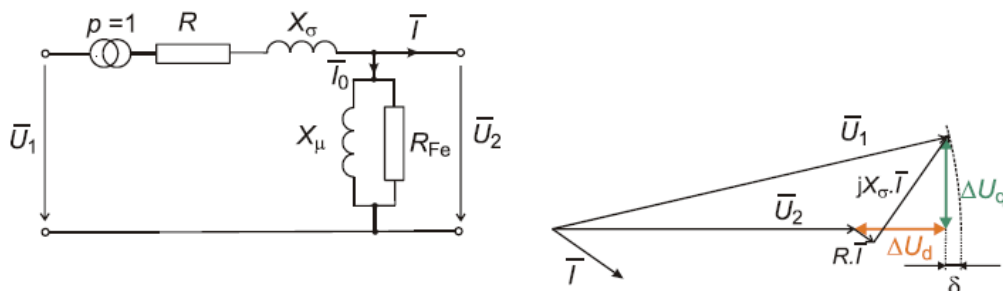
$$i_0 = \frac{I_0}{I_n} = \frac{U_n \sqrt{G_{Fe}^2 + B_\mu^2}}{\sqrt{3} I_n} = \sqrt{g^2 + b^2} = y$$

kde  $g = \frac{Z_n}{R_{Fe}} = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n R_{Fe}} = \frac{U_n^2}{\sqrt{3} I_n U_n R_{Fe}} = \frac{\Delta P_0}{S_n}$  je poměrná hodnota příčné vodivosti TR a  $b = \frac{Z_n}{X_\mu} = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n X_\mu} = \sqrt{y^2 - g^2}$  je poměrná hodnota magnetizační susceptance TR.

### 4.3. Úbytek napětí na transformátoru

Většina distribučních TR VVN/VN je konstruována jako trojvínutové. Výhoda terciálního vinutí se projeví hlavně při provozování nesymetrické soustavy. V rozsahu této práce, považuji za zbytečné s ní pracovat, a proto si dovoluji předpokládat soustavu symetrickou. Při výpočtu  $\Delta U$ , lze postupovat následujícím způsobem, popsáným ve zdroji [2]:

Úbytek napětí se určí jako rozdíl velikosti napětí na primární straně TR a velikosti napětí na straně sekundární (přepočítané pomocí převodu). Při odvození se v tomto zdroji vychází ze zjednodušeného náhradního schématu (viz následující obrázek převzatý z uvedeného zdroje i s fázorovým diagramem) a předpokladu, že převod TR je roven jedné a velikost proudu naprázdno roven nule.



Obr. 17: Náhradní schéma TR a fázorový diagram pro určení úbytku napětí [2]

Jestli-že  $\Delta U = U_1 - U_2$  pak pro poměrnou hodnotu platí:  $\Delta u = \frac{\Delta U}{U_2} = \frac{U_1 - U_2}{U_2} = \frac{U_1}{U_2} - 1$  (1)

velikost napětí  $U_1$  lze následně vyjádřit vztahem:  $U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_d)^2 + \Delta U_q^2}$  (2)

kde  $U_2$  je nominální fázové napětí sekundární strany,  $\Delta U_d = R \cdot I \cdot \cos\varphi + X_\sigma \cdot I \cdot \sin\varphi$ ,  
 $\Delta U_q = X_\sigma \cdot I \cdot \cos\varphi - R \cdot I \cdot \sin\varphi$ ,  
 ( $I$  reprezentuje proud zatížení TR).

Poměr zatížení napětí  $U_1$  a  $U_2$  v rovnici (2) potom bude:

$$\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\frac{(U_2 + \Delta U_d)^2 + \Delta U_q^2}{U_2^2}} = \sqrt{1 + 2 \cdot \frac{\Delta U_d}{U_2} + \frac{\Delta U_d^2 + \Delta U_q^2}{U_2^2}} \quad (3)$$

kde  $\Delta u_d = \frac{\Delta U_d}{U_2} = \frac{R \cdot I \cdot \cos\varphi}{U_2} + \frac{X_\sigma \cdot I \cdot \sin\varphi}{U_2}$  a  $\Delta u_q = \frac{\Delta U_q}{U_2} = \frac{X_\sigma \cdot I \cdot \cos\varphi}{U_2} + \frac{R \cdot I \cdot \sin\varphi}{U_2}$

úpravou těchto výrazů získáme:  $\Delta u_d = \frac{R I_n \sqrt{3}}{U_n} \frac{I}{I_n} \cos\varphi + \frac{X_\sigma \cdot I_n \sqrt{3}}{U_n} \frac{I}{I_n} \sin\varphi$  (4)

$$\Delta u_d = r \cdot i \cdot \cos\varphi + x \cdot i \cdot \sin\varphi \quad (5)$$

$$\Delta u_q = x \cdot i \cdot \cos\varphi + r \cdot i \cdot \sin\varphi \quad (6)$$

Hodnoty  $r$  a  $x$  lze určit ze vztahů:  $r = \frac{R}{Z_n} = \frac{\sqrt{3} I_n}{U_n} R = \frac{3 I_n^2 R}{\sqrt{3} I_n U_n} = \frac{\Delta P_k}{S_n}$   
 $x = \frac{X_\sigma}{Z_n} = \frac{I_n}{\sqrt{3} U_n} X_\sigma = \frac{3 I_n^2 R}{\sqrt{3} I_n U_n} = \sqrt{z^2 - r^2}$  kde  $z = u_k$

Odmocninu v rovnici (3) lze řešit pomocí "Taylorova rozvoje":

$$\sqrt{1 + y} = 1 + \frac{1}{2}y - \frac{1}{8}y^2 + \frac{1}{48}y^3 \dots \text{ pro } |y| \leq 1 \text{ kde } y = 2 \cdot \frac{\Delta u_d}{U_2} + \frac{\Delta u_d^2 + \Delta u_q^2}{U_2^2} \quad (7)$$

Použijeme-li první tři členy tohoto rozvoje, lze výraz (3) přepsat do tvaru:

$$\frac{U_1}{U_2} = 1 + \frac{1}{2}(2\Delta u_d + \Delta u_d^2 + \Delta u_q^2) - \frac{1}{8}(2\Delta u_d + \Delta u_d^2 + \Delta u_q^2)^2 \quad (8)$$

a tak  $\Delta u = \Delta u_d + \frac{1}{2}\Delta u_q^2 - \frac{1}{2}\Delta u_d^3 - \frac{1}{2}\Delta u_d \Delta u_q^2 - \frac{1}{4}\Delta u_d^2 \Delta u_q^2 - \frac{1}{8}\Delta u_d^4 - \frac{1}{8}\Delta u_q^4$  (9)

Pro výpočet úbytku napětí stačí použít pouze první dva členy z (9) do kterých dosadíme

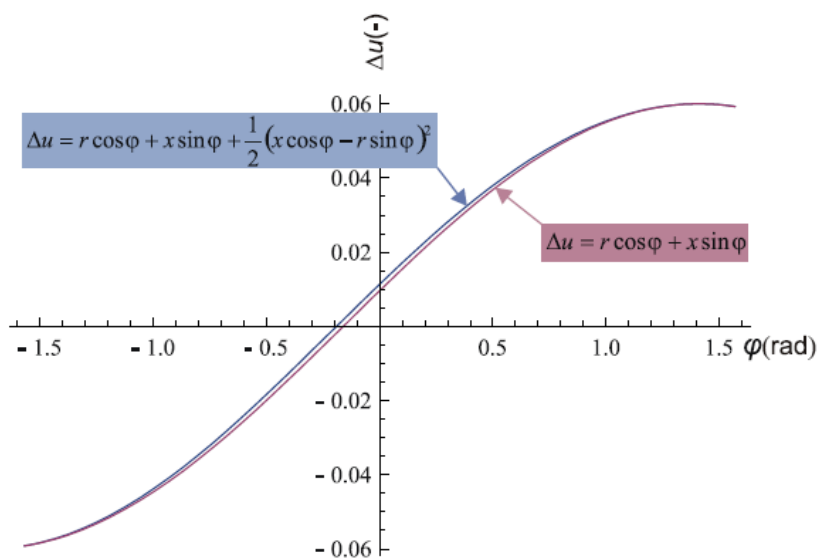
vztahy (5) a (6) čímž z  $\Delta u = \Delta u_d + \frac{1}{2} \Delta u_q^2$  dostaneme vztah:

$$\Delta u = r \cdot i \cdot \cos\varphi + x \cdot i \cdot \sin\varphi + \frac{1}{2} (x \cdot i \cdot \cos\varphi - r \cdot i \cdot \sin\varphi)^2 \quad (10)$$

Při jmenovitém zatížení  $I = I_n$  je  $i = 1$  a výraz (10) můžeme zjednodušit do podoby:

$$\Delta u = r \cdot \cos\varphi + x \cdot \sin\varphi + \frac{1}{2} (x \cdot \cos\varphi - r \cdot \sin\varphi)^2$$

Chyba  $\delta$ , které se podle uvedeného zdroje při zjednodušení  $\Delta u = r \cdot \cos\varphi + x \cdot \sin\varphi$  dopouštíme, je znázorněna na následujícím obrázku převzatém z téhož zdroje [2]. Chyba je znázorněna pro jmenovité zatížení TR v rozsahu úhlu mezi U a I od čistě kapacitní po čistě induktivní zátěž.



Obr. 18: Graf s vyjádřením chyby výpočtu  $\Delta u$  pro různý charakter zátěže TR [2]

## 5. MODEL REGULÁTORU

Jak již bylo řečeno v úvodu, pro potřeby této práce jsem v aplikaci ME Excel připravil výpočetní úlohu, která na základě zadaného vstupního napětí a proudu vypočte výstupní napětí pro každou jednotlivou odbočku TR 110/22kV. Následně určí, které vyhovují zadaným mezím, v nichž se smí napětí pohybovat (stejně jako je tomu u skutečných HW regulátorů).

Funkci modelu jsem ověřil s využitím dat, které mi poskytly zaměstnanci PREdi (ze skupiny Řídicí systémy) za období od 1. do 15. 4. 2015. Vstupem pro samotný výpočet je napětí  $U_1$ [kV] na primární straně TR a proud  $I_2$ [A] na straně sekundární. K ověření správnosti, pak využívám porovnání shody odbočky, se kterou daný TR v uvedeném čase skutečně pracoval, a odbočky vypočtené modelem. Přehled transformátorů 110/22kV s nimiž jsem testování prováděl je včetně jejich parametrů uveden v následující tabulce:

Rozvodna: Trafo:	BEE T101	BEE T102	BEE T103	JIH T101	JIH T102	PKV T101	PKV T102	LET T103
Nominální výkon $S_n$ [MVA]	40,0	40,0	40,0	63,0	63,0	63,0	63,0	40,0
$u_k$ [%]	10,80	10,80	11,27	17,01	16,53	17,40	17,36	11,20
$i_0$ [%]	0,44	0,44	0,76	0,22	0,20	0,15	0,15	0,76
$dP_0$ [kW]	42,00	42,19	48,00	39,65	38,21	22,80	33,67	48,00
$dP_k$ [kW]	213,0	213,0	232,5	359,0	359,0	203,8	197,0	232,5
odbočky TR	110 ± 8x 2%							
převod (primár/sekundár/terciál)	110 / 23 / 6,3							
v regulátoru nastavená hladina U	všude 102% $U_n$ , pouze PKV 101% $U_n$							
v regulátoru nastavená toleranec	1,2% $U_n$							

Obr. 19: Tabulka se základními údaji a parametry vybraných TR [15]

### 5.1. Popis a ověření funkce

Jelikož je celý sešit "Model\_REG.xlsx" jako samostatná příloha součástí této práce, popíš zde velmi stručně jeho členění a základní funkce.

Na prvním listu "DATA" jsou veškeré dostupné údaje z deníku pětiminutových měření, které se k dané transformovně podařilo získat. I když popisy a množství údajů k jednotlivým polím R110/22kV se značně liší (v závislosti na instalované technologii, rozdílném počtu polí a s přihlédnutím k době vzniku řídicího systému) vždy se jedná o záznam absolutní hodnoty daného údaje s vzorkovací frekvencí 5 minut po dobu prvních 14 dní dubna 2015. Uvedená časová osa je přerušena na třech místech, což je způsobeno centrálním výpadkem systému

TG8000 který data na archivní server ukládá (jedná se o výpadek maximálně 2 měřených hodnot za sebou).

Druhý list "MODEL\_complex" obsahuje verzi u které je výpočet založen na práci s fázory potřebných veličin, dle teorie uvedené ve zdroji [11]. Základním vztahem pro výpočet je zde vzorec:  $dU=(R + jX) * (I_{\text{činný}} + jI_{\text{jalový}})$ . Dále tento list nemá smysl popisovat, protože po funkční stránce je takřka totožný s listem posledním.

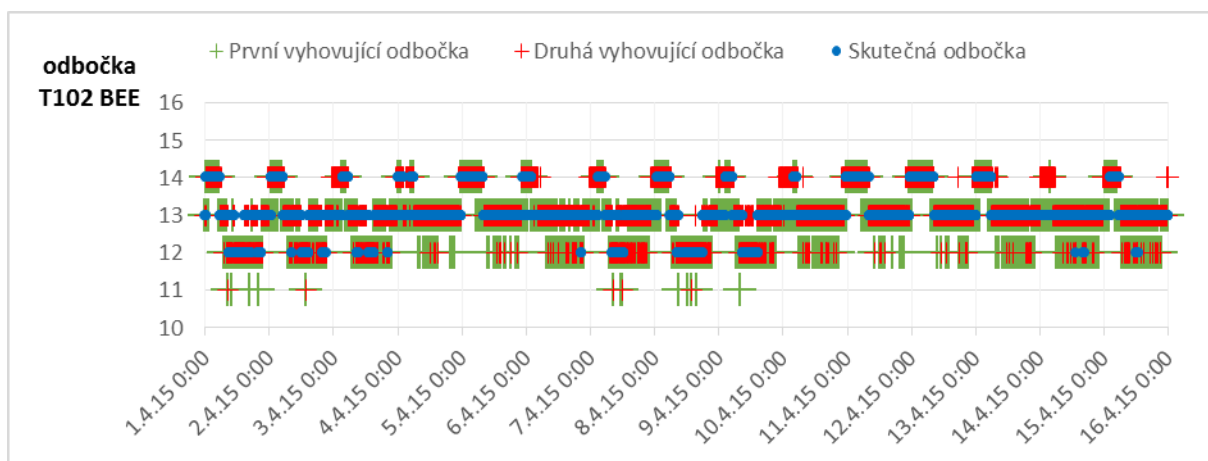
U třetího listu "MODEL\_ok" je výpočet založen na vzorci popsaném v teoretické části této práce (kapitola 4.3) převzaté ze zdroje [2]. Rozdíly ve vypočtené hodnotě napětí  $U_2$  se od sebe v obou případech liší řádově o desítky voltů, což považuji pro potřeby této práce za naprosto přijatelné. Vzhledem k tomu, že tento model vznikl později, obsahuje pár drobných vylepšení, díky nimž nadále pracuji pouze s ním. A teď již k samotnému popisu:

- Řádky 2 až 10 obsahují tabulku s parametry k jednotlivým TR a odkazy na to, jaké údaje se při výběru konkrétního TR mají načíst z listu "DATA".
- Volba transformátoru probíhá přes výběr z "rozevíracího seznamu" v buňce C23.
- Poté dojde automaticky k načtení hodnoty nominálního výkonu TR a napětí nakrátko, rovněž se automaticky aktualizují měřené údaje získané z řídicího systému v řádcích 16 až 21 (jedná se o skutečné, v daném okamžiku měřené či zaznamenané hodnoty k příslušnému TR - těmi jsou napětí na přípojnicí 110kV k níž je TR připojeno, napětí a proud na sekundární straně, zaznamenaná odbočka, činný a jalový výkon).
- Ručně je nutné zadat hodnoty do buněk C24 až C26 týkající se nominálních napětí.
- Hodnota R v F25 reprezentující odpor vinutí (výpočet těchto parametrů je na konci tabulky v řádcích 2 až 10 a hodnota patřící aktuálně vybranému TR se automaticky kopíruje do C16)
- Hodnota X reprezentující rozptylovou reaktanci, je vypočtena pro nulovou odbočku a stejně jako R v předchozím případě, se vypočítává pro nultou odbočku na konci tabulky v řádcích 2 až 10. Hodnota pro aktuální TR se kopíruje do C17. Pro zbývající odbočky se automaticky upraví, podle závislosti zobrazené na grafu v oblasti D50 až I68. Závislost a průběh grafu lze změnit výběrem jiné sady v B51.
- Možnost korekce X v F26 slouží pouze pro účely ladění a není třeba jí zadávat.
- Po zadání hodnoty limit  $U_n$  v I35 a tolerance v I38, se automaticky doplní středová hladina a hodnoty horní a dolní mez tolerance v buňkách I41, I44 a I47.
- Poté proběhne automaticky výpočet a v řádcích 32 až 48 se zeleně vybarví vyhovující odbočky pro každý časový interval z osy v řádku 15.

Po proběhnutí výpočtu se automaticky aktualizují grafy, ručně je možné upravit hodnotu časové osy, kdy minimální hodnota 42085 reprezentuje datum 1. 4. 2015 a maximální hodnota 42110 datum 15. 4. 2015. Každé celé číslo v tomto intervalu představuje jeden den,

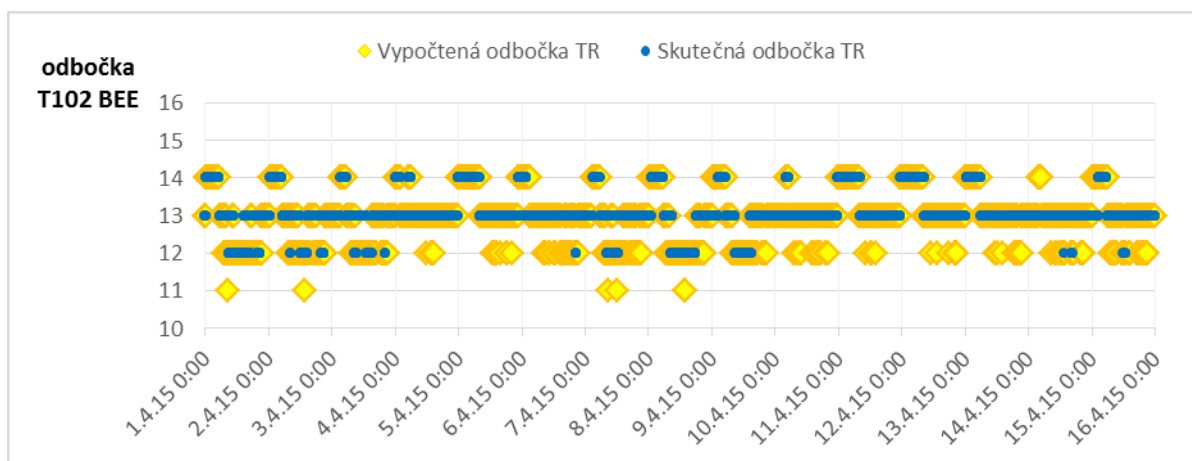
desetinná místa pak časový údaj ve formátu hodina:minuta:sekunda. Ostatní vypočtené hodnoty nebo vstupy pro výpočet jsou zobrazovány v řádcích 22 až 31.

Vzhledem k tomu, že zadaným mezím pro výpočet výstupního napětí, velmi často odpovídají dvě hodnoty (viz následující graf), bylo třeba do modelu implementovat určitou logiku pro výběr vhodné odbočky na základě okamžité hodnoty vstupních parametrů.



Obr. 20: Graf porovnávající shodu skutečné odbočky T102 BEE s oběma vypočtenými

Skutečný regulátor, se řídí hodnotami měřenými v cca 100ms intervalu a k přepnutí odbočky dá povel až po určité době (většinou 3 minuty), po kterou musí být měřené napětí mimo zadané meze. Tuto logiku však nešlo použít - k dispozici jsou pouze data s aktuálním stavem po 5 minutách. Proto jsem u svého modelu zvolil přístup, že pokud vyhovují dvě odbočky a není důvod k přepnutí, zkontroluji si předchozí odbočku a je-li shodná s jednou z vyhovujících, zůstávám, jinak přepnu na nejbližší vyhovující. To má však za následek, že se v určitých bodech průběh regulace rozchází se skutečným stavem, tak jak je vidět na následujícím grafu opět pro T102 na rozvodně Běchovice.



Obr. 21: Graf porovnávající shodu skutečné odbočky T102 BEE s vybranou vypočtenou



Na základě těchto grafů vytvořených pro vybrané TR, bylo možné usoudit na přijatelnou funkčnost vytvořeného modelu regulátoru i zvolené logiky výběru odbočky v případech, kdy vyhovují daným mezím dvě rozdílné odbočky.

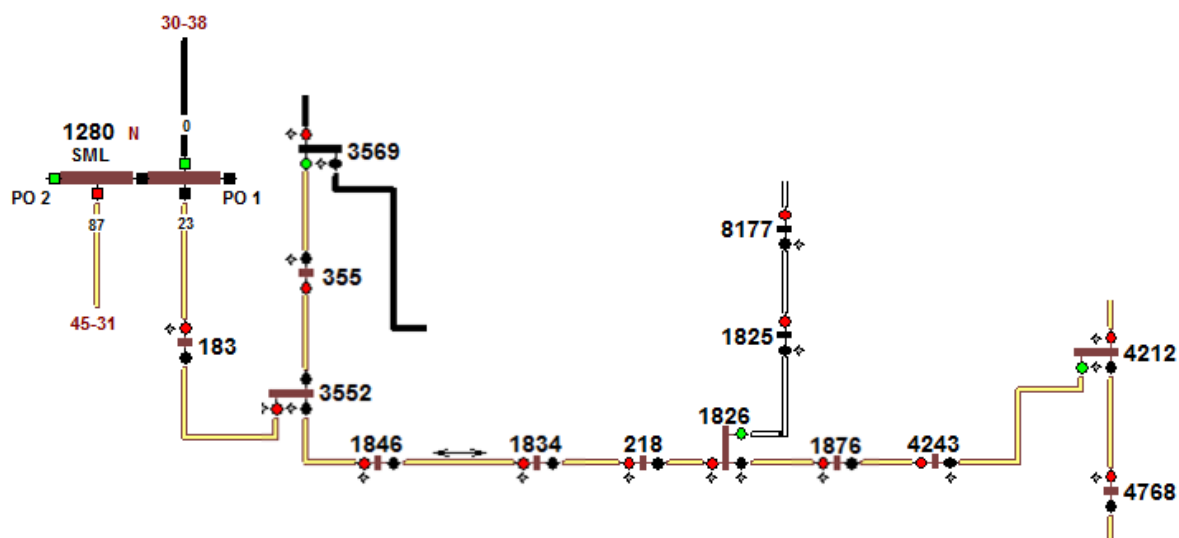
## 5.2. Výpočet chodu sítě

Po ověření funkčnosti modelu na několika různých TR, bylo možné použít hodnoty z modelu jako vstup pro výpočetní program vytvořený v aplikaci MATLAB. Základní algoritmus pro výpočet ustáleného chodu, jsem získal po úpravě kódu, s kterým jsem se setkal během studia na FEL a který je pro studenty předmětu RES ("Řízení energetických soustav") k dispozici na stránkách serveru PowerWiki [14].

Tento program umožňuje zadat soustavu uzlů a větví, jenž tvoří elektrizační soustavu a po zadání potřebných parametrů vypočte základní údaje pro každý uzel - pro potřeby této práce je tím nejdůležitějším úbytek napětí dU. K větvím je potřeba doplnit parametry vedení jednotlivých linek (délka, průřez, R a X). K uzlům potom nominální napětí, typ uzlu jaký v síti představují a výkony (činný a jalový) které ze sítě odebírají, případně do ní dodávají. Tyto údaje se zadávají do prvních dvou listů sešitu "data00.xls". Před samotným spuštěním výpočtu, je nutné v "PF.m" upravit hodnoty specifikující pole uzlů a větví (ty jsou v sešitě "data00.xls" na listě "uzly" v L3 a na listě "vedení" v M3) - výsledky výpočtu se automaticky zapíší do listů "větve-výsledky" a "uzly-výsledky".

Tímto způsobem lze ale vypočítat chod sítě pouze pro jeden časový řez - pro účely práce bylo třeba doplnit další část kódu, která umožňuje načíst pole dat obsahující napětí a výkony pro zvolený počet časových intervalů. To umožňuje doplněná část "diplomka.m" která po spuštění načte údaje zadané v dokumentu "vstup.txt" a pro každou sadu vstupních hodnot, spočítá dU v jednotlivých uzlech sítě zadané v "data00.xls". Tyto hodnoty ukládá do sešitu "výsledek.dat" z něhož je převádím do příslušných listů sešitu "vysledky.xlsx" a využívám k další práci.

Popsaný postup jsem odzkoušel na několika skutečných vývodech napájených z vybraných TR. Pro demonstraci výsledků výpočtu jsem zvolil vývod K45-31 napájený z transformátoru T102 BEE. Schéma distribuční sítě, tak jak je zobrazené v aplikaci NETAN [15] je vidět na dalším obrázku. Napájecí kabel 45-31 z R Běchovice vede do první RS 1280 (což je velké obchodní centrum) a zhruba  $\frac{1}{4}$  přivedeného výkonu je následně vedena dále do napájecí linie, dTS 3552 a 1826 až do 4212. Červené barvy značí přívod do stanice (●), černé vývod ze stanice (●) a zelené rozepnutý vypínač příslušného směru ve stanici (●)



Obr. 22: Schéma linie napájené kabelem 45-31 z T102 R Běchovice [15]

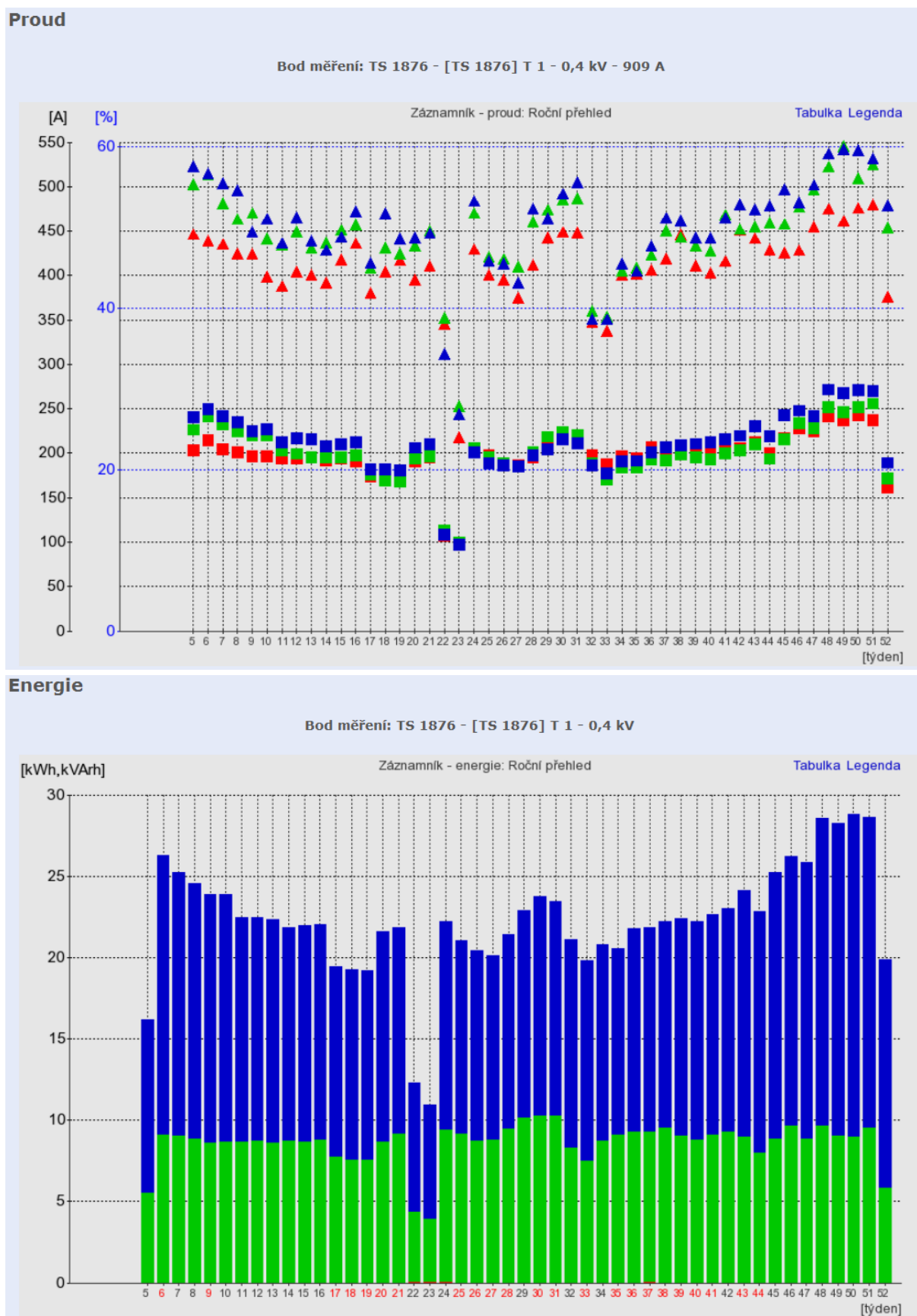
Zobrazené linii odpovídají podle stejného zdroje [15] následující parametry:

Vývod	úsek	délka [m]	průřez	kabel
45-31	1280	6820	240	AXEKVCEY
	183-1280	763	120	AXEKVCEY
	183-3552	1233	120	AXEKVCEY
	355-3552	972	120	AXEKVCEY
	355-3569	2435	120	AXEKVCEY
	1846-3552	465	120	AXEKVCEY
	1834-1846	16	120	AXEKVCEY
	218-1834	247	120	AXEKVCEY
	218-1826	620	120	AXEKVCEY
	1826-1876	587	120	AXEKVCEY
	1876-4243	900	120	AXEKVCEY
	4212-4243	308	120	ANKTOY

Obr. 23: Tabulka s parametry nezbytnými pro výpočet chodu sítě pro vybranou linii [15]

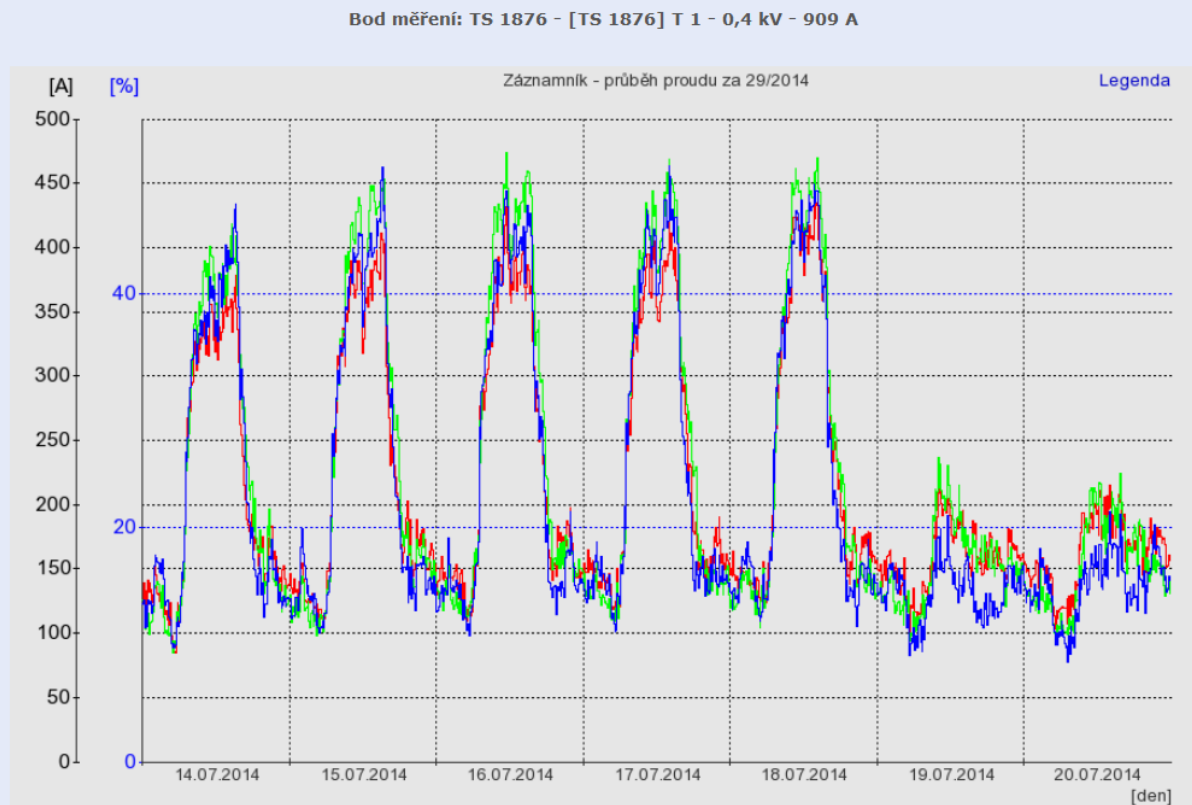
Přehled o zatížení jednotlivých TR v dTS jsem získal z další aplikace společnosti PREDi která využívá informace z "kvalitoměru" MEG40, jenž by měly být osazeny v každé provozované stanici. Tyto univerzální monitory zaznamenávají v desetiminutových intervalech hodnoty měřených veličin (napětí, proud, výkon a energie).

Pro demonstraci přikládám obrázky s ročními záznamy o proudu a energii ze stanice dTS 1876. Týdenní hodnoty je možné v provozované aplikaci "WebDator" dále rozbalit až do úrovně denních průběhů.

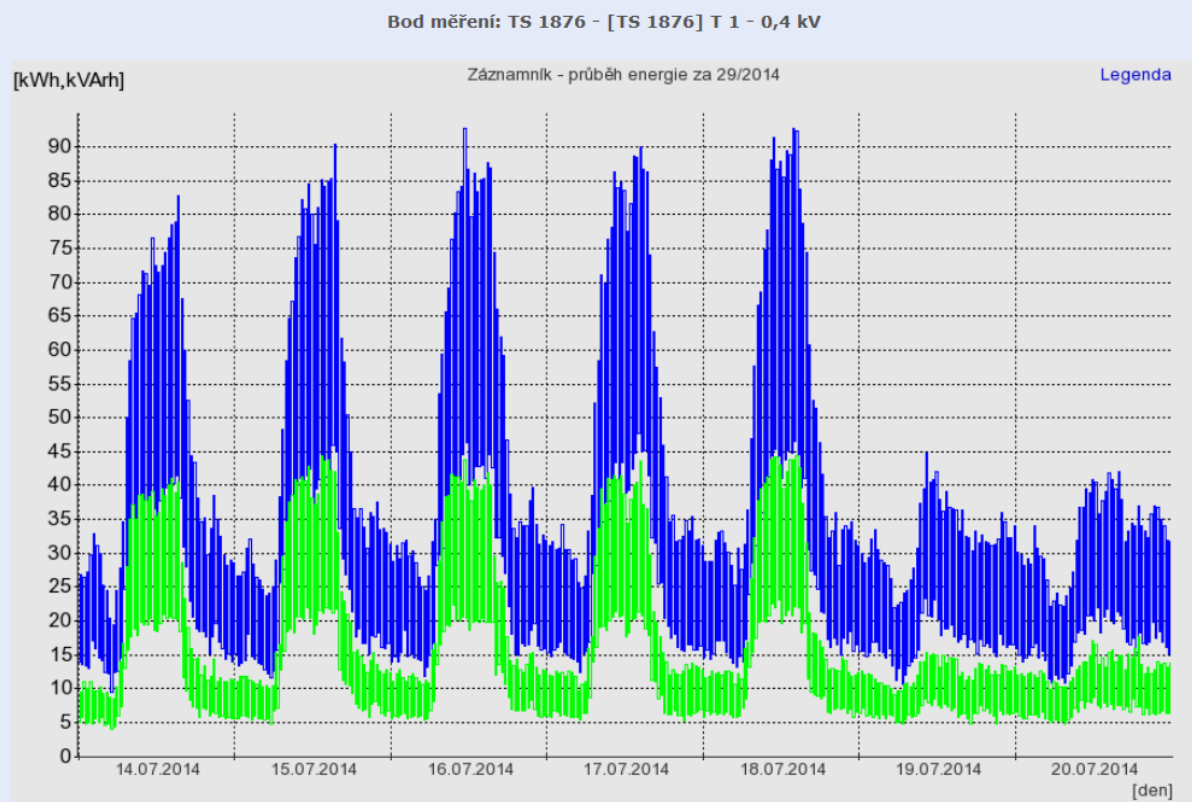


Obr. 24: Ukázka záznamu hodnot měřených v dTS 1876 za celý rok 2014 [15]

## Proud



## Energie



Obr. 25: Ukázka záznamu měřených hodnot v dTS 1876 v průběhu jednotlivých dnů [15]

## 6. ANALÝZA DISTRIBUČNÍ SÍTĚ PREDi

Distribuční soustava VN, společnosti PREDistribuce a. s. je tvořena převážně kabelovou sítí, provozovanou nejčastěji paprskovým a průběžným způsobem. Nejvíce jsou v této síti zastoupeny kabely AXEKVCEY a ANKTOY o průřezu 240 a 120mm<sup>2</sup>. Jednotlivé napájecí linie jsou složeny z relativně krátkých úseků (maximálně jednotky km mezi dvěma sousedními uzly) o celkové délce cca 15km a maximálním přenášeném výkonu 10MW.

Ačkoliv navržený model umí zpracovat data pro všechny vybrané TR a výpočet chodu sítě jsem provedl pro několik různých vývodů napájených z těchto TR, vybral jsem (z důvodu rozsahu práce) pro analýzu a následnou demonstraci výstupu pouze jeden referenční vývod. Tím je vývod K45-31 napájený z T102 R 110/22kV Běchovice a to hlavně proto, že tento vývod je již podrobně popsán v předchozí kapitole, týkající se funkce navrženého modelu regulace napětí a výpočtu chodu sítě. Nejdůležitější výsledky výpočtu pro vybraný den (2. dubna 2015) vynáším pro všechny uvažované scénáře do dvou samostatných grafů.

V prvním grafu je vyneseno napětí na sekundární straně regulovaného TR, které je v podstatě totožné s napětím na začátku vývodů K45-31. Toto napětí je pomocí přepínání odboček udržováno v regulovaných mezích. Dalším průběhem vneseným do tohoto grafu je hodnota napětí v uzlu s největším úbytkem, tj. dTS 4243. Zde kontroluji hlavně to, zda nepřekračuje některou z dalších stanovených mezí. Rovněž v případech, kdy se jedná pouze o teoretickou linii (odpovídající svými parametry stále ještě reálnému stavu, ale lépe vyhovující účelům demonstrace), zachovávám pro rozlišení začátku a konce linie popsané značení. Ke stejné datové ose se vztahují rovněž veškeré limitní hodnoty dané nastavenou tolerancí regulátoru, pravidly provozovatele soustavy a technickými normami v souladu s požadavky na kvalitu dodávky. Posledním průběhem vneseným do tohoto grafu, je hodnota odbočky vypočtené modelem pro zadané vstupní hodnoty v daný časový okamžik, ta jediná je vynášena na vedlejší datovou osu.

V druhém grafu je zobrazena hodnota proudu tekoucího do uvažovaného vývodu a hodnota úbytku napětí mezi začátkem a koncem linie (rozdíl mezi místem s nejmenším a největším úbytkem napětí) v průběhu stejného dne a ve stejných časových řezech jako u grafu prvního. Každá z těchto hodnot, je vynášena na samostatnou datovou osu (pro lepší přehlednost jsou barevně rozlišeny). Vzhledem k rozsahu hodnot, mezi nimiž se tyto veličiny pohybují, nebylo vhodné u těchto grafů dodržet jednotné měřítko, takže při porovnávání průběhu jednotlivých variant je třeba dbát na absolutní hodnotu vynášených veličin.

Na závěr jednotlivých bloků přidávám přehledovou tabulku s maximální a minimální hodnotou, mezi níž se vybrané veličiny pohybují.

## 6.1. DS PREDi bez uvažování nových trendů

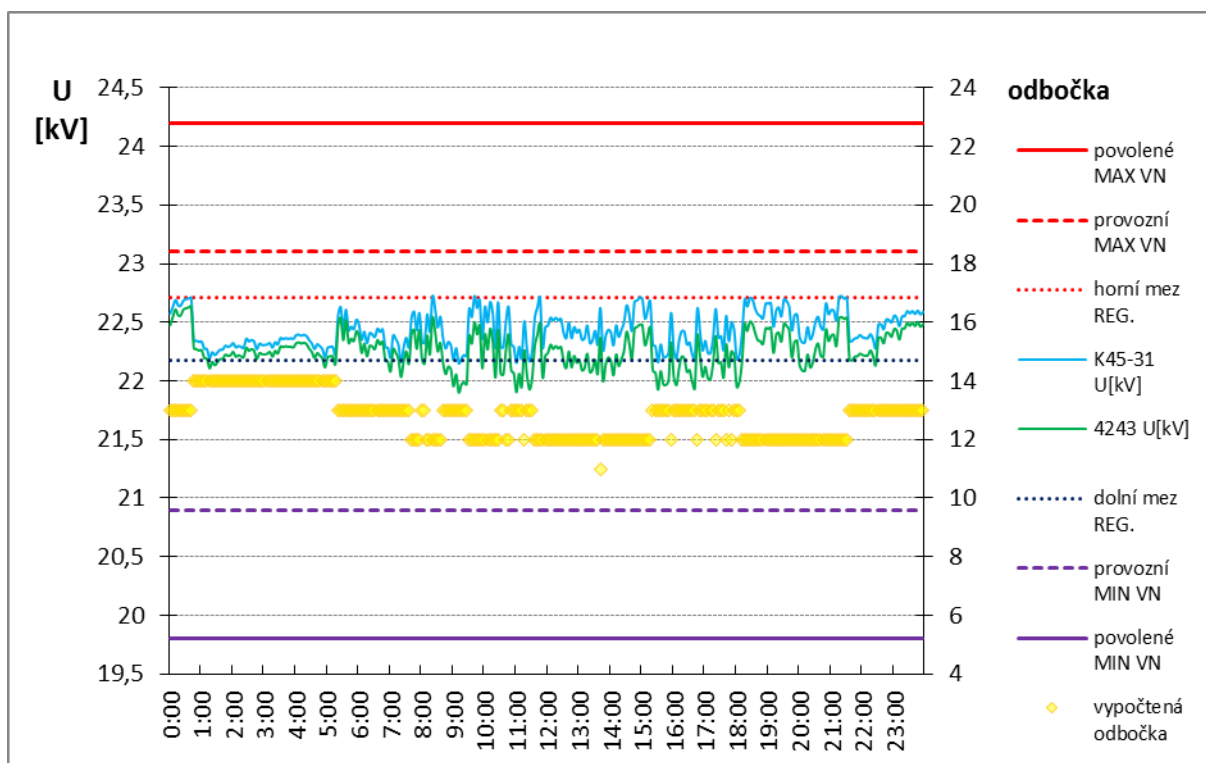
V této části práce prezentuji výsledky pro tři reálné scénáře, s nimiž se za současné situace skutečně můžeme setkat v distribuční síti provozované společností PREDistribuce, a. s., těmi jsou:

1. Průběh regulace napětí na T102 R Běchovice sestavený modelem na základě reálných hodnot měřených ŘS a výpočet chodu sítě pro referenční vývod K45-31.
2. Dvě teoretické linie, pro které lze předpokládat, že mohou být v DS PREDi limitní z pohledu délky a přenášeného výkonu (90% výkonu se přenáší až na konec linie):
  - a. venkovní vedení AIFe 90 o délce 12km přenášející maximální výkon 5MW,
  - b. kabelové vedení složené z 15km kabelu AKCEVCEY 240 a 10km AKCEVCEY 120 přenášející maximální výkon 10MW.

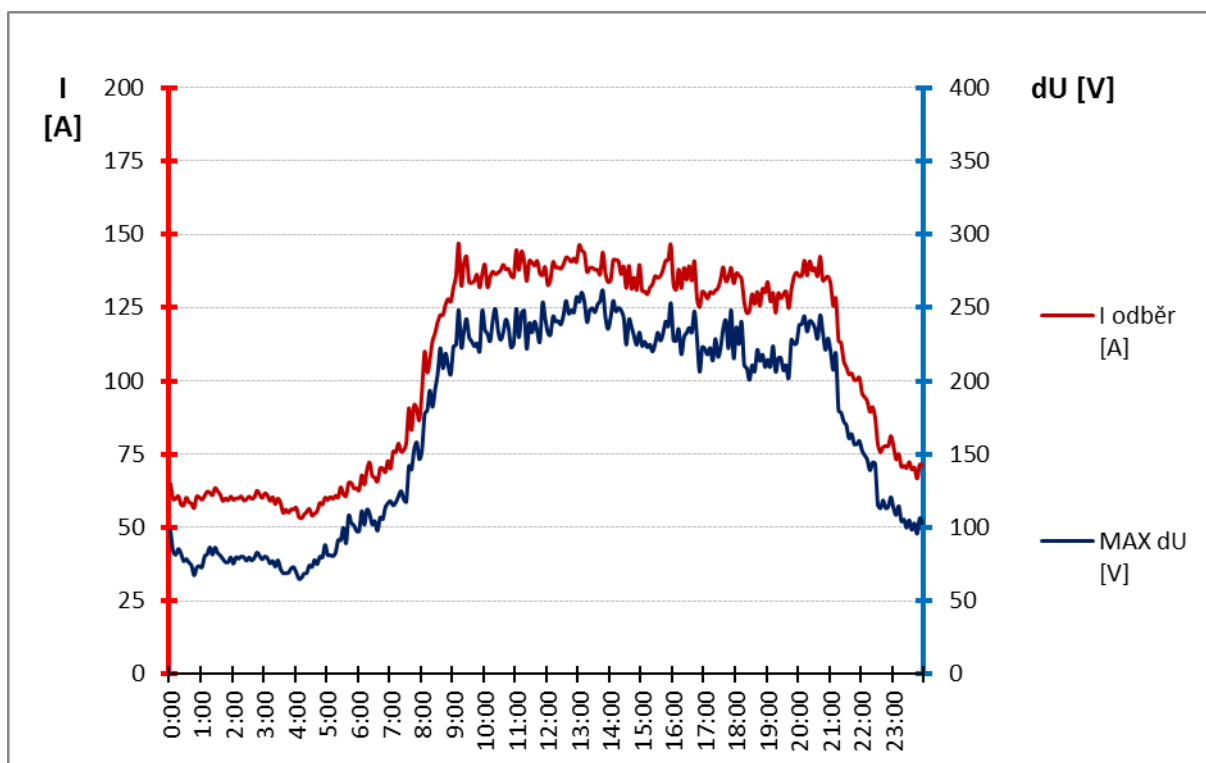
Do tohoto bloku jsem zařadil rovněž variantu, v níž ověřuji možnosti a dopady zavedení kompaundance. Tato funkce se v současné době u většiny regulátorů PREDi nevyužívá.

3. Vliv zavedení „kompaundance“ (regulační meze se lineárně mění v závislosti na zatížení TR se směrnicí 6% Un na 1000A) pro uvažovaný limitní stav kabelového vedení 15 a 10km z předchozího příkladu, kdy se 90% z přenášeného výkonu 10MW spotřebuje až na konci linie.

### 6.1.1. Referenční vývod VN



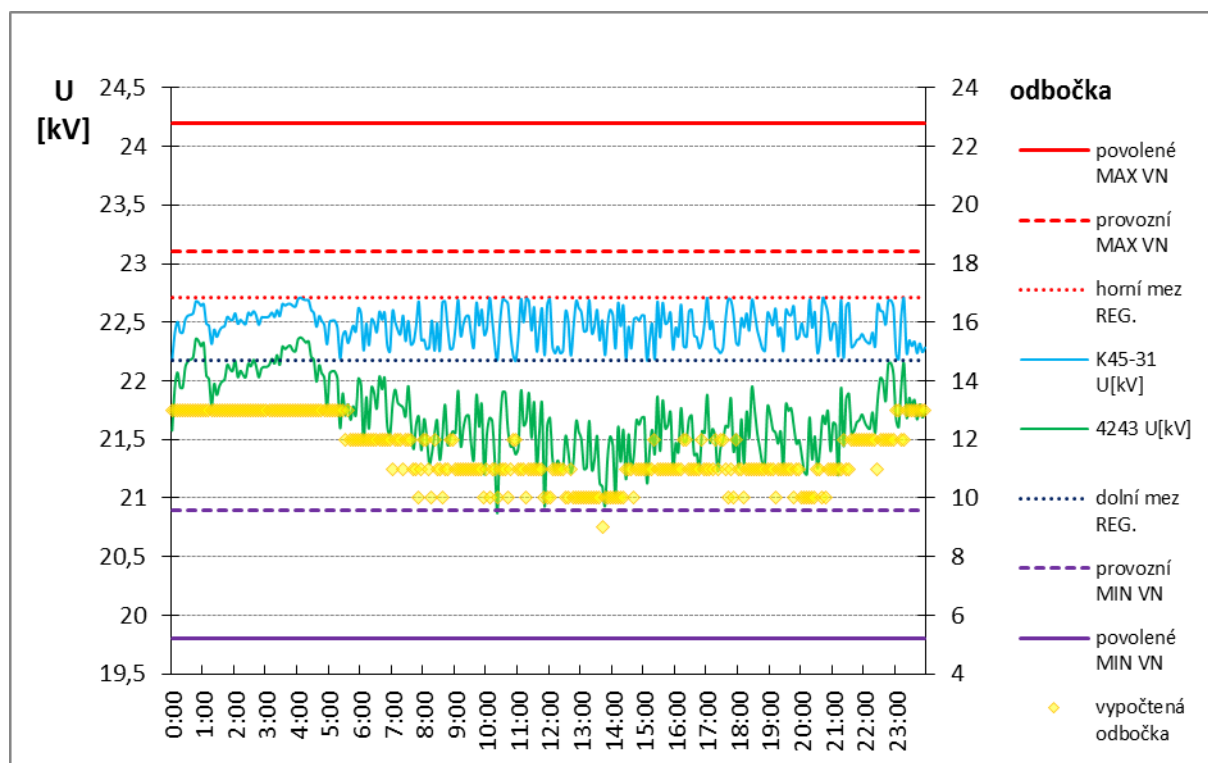
Obr. 26: Výpočet chodu sítě pro vývod K45-31 a průběh regulace pro T102 BEE



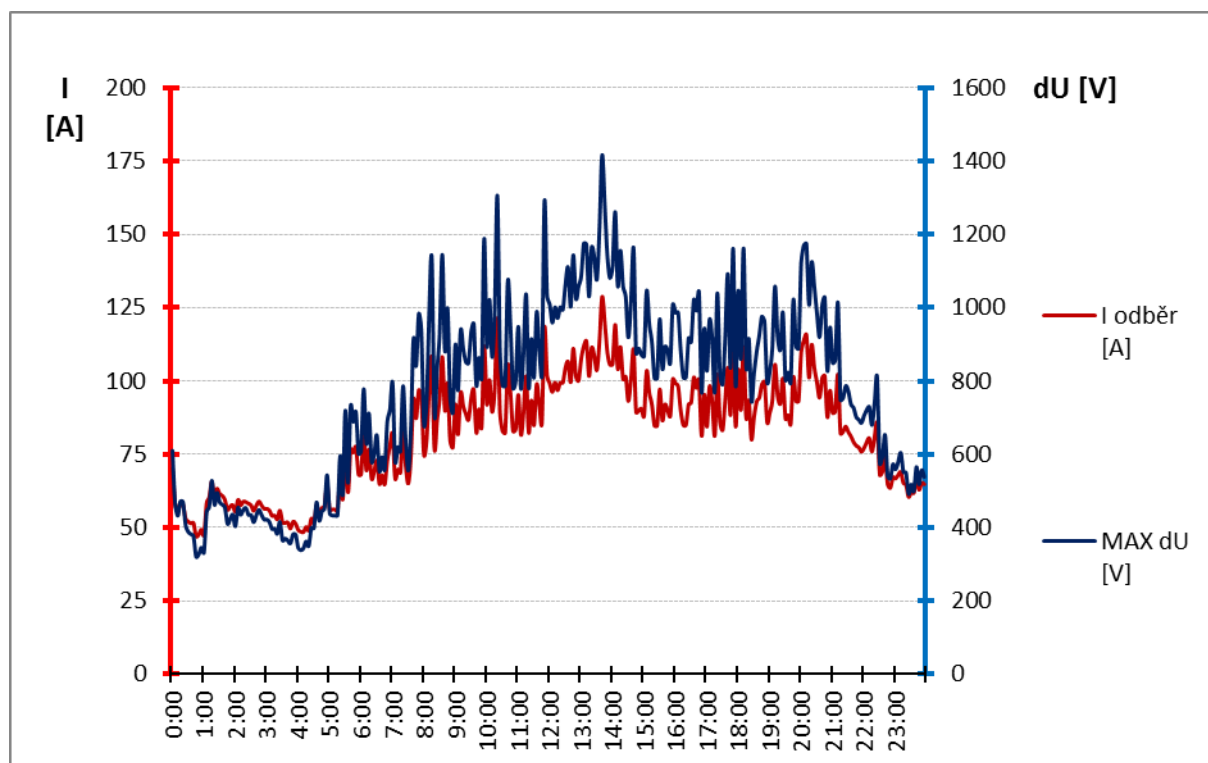
Obr. 27: Zatížení vývodu K45-31 a maximální úbytek napětí v napájecí linii



## 6.1.2. Limitní stavy stávající DS VN

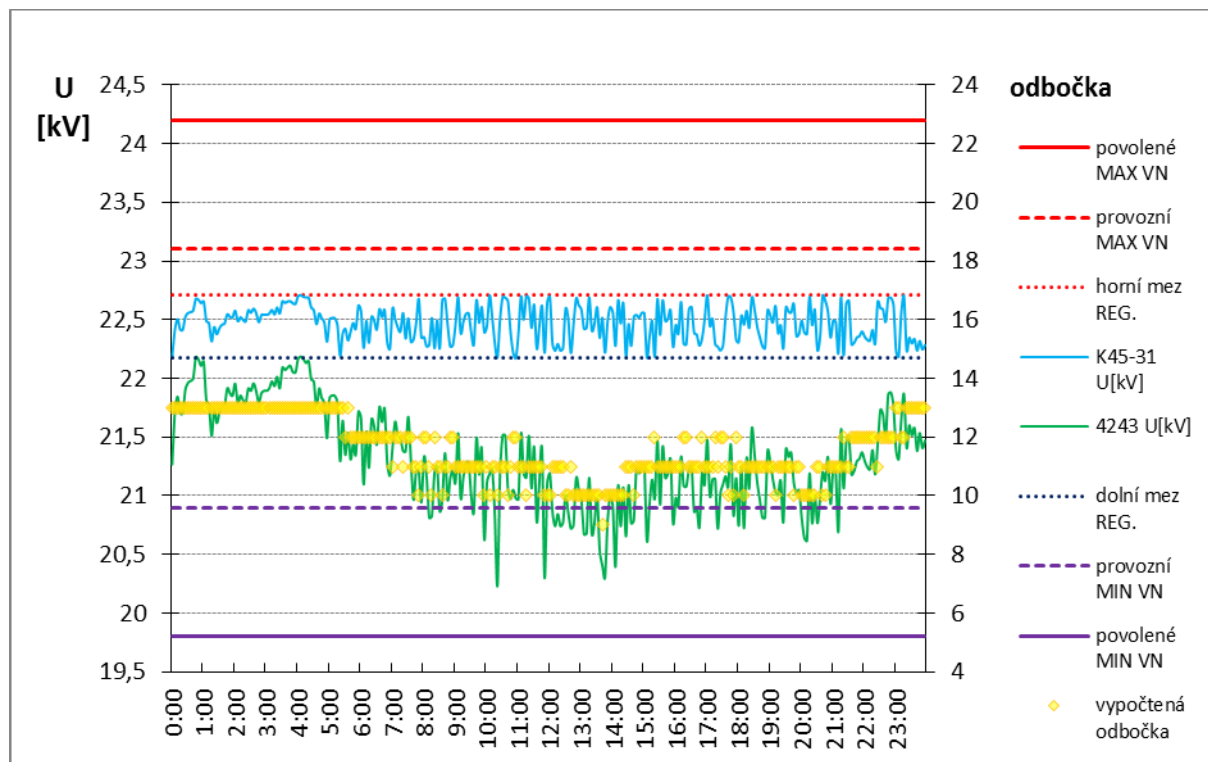


Obr. 28: Výpočet pro venkovní vedení AlFe90 o délce 12km

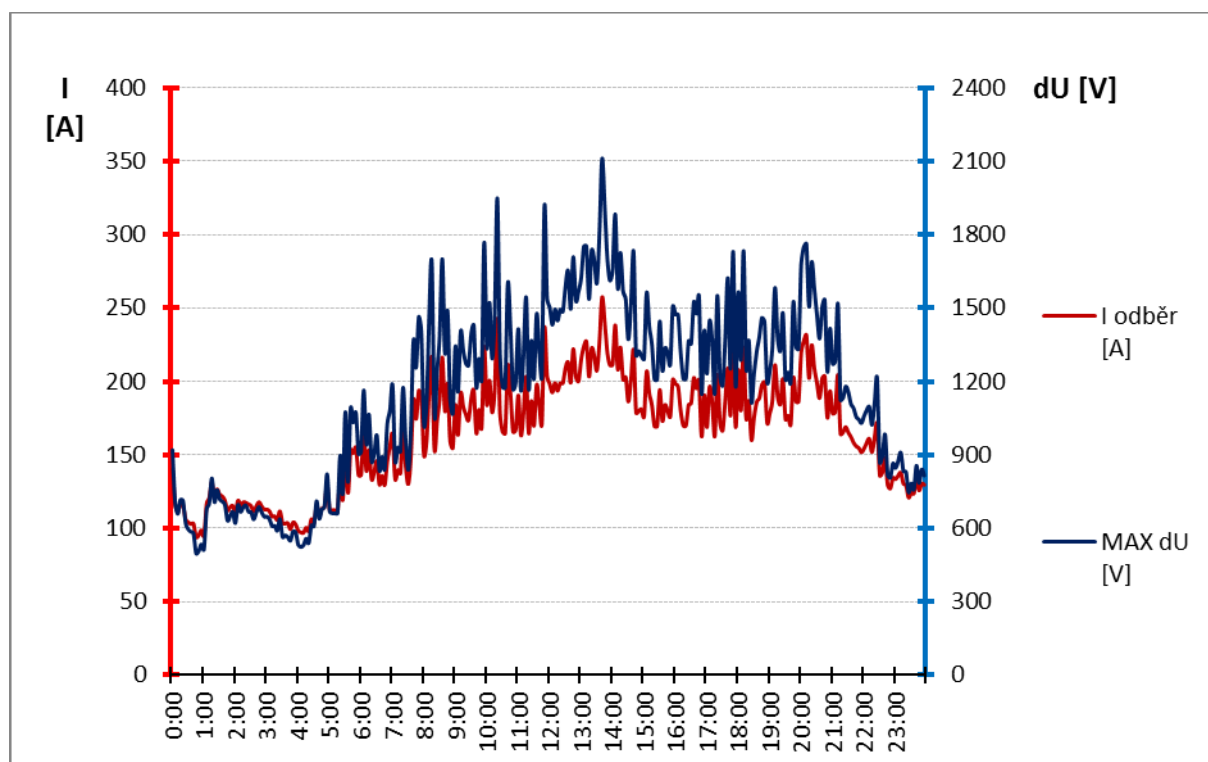


Obr. 29: Zatížení vývodu a maximální úbytek napětí na vedení AlFe pro odběr 5MW



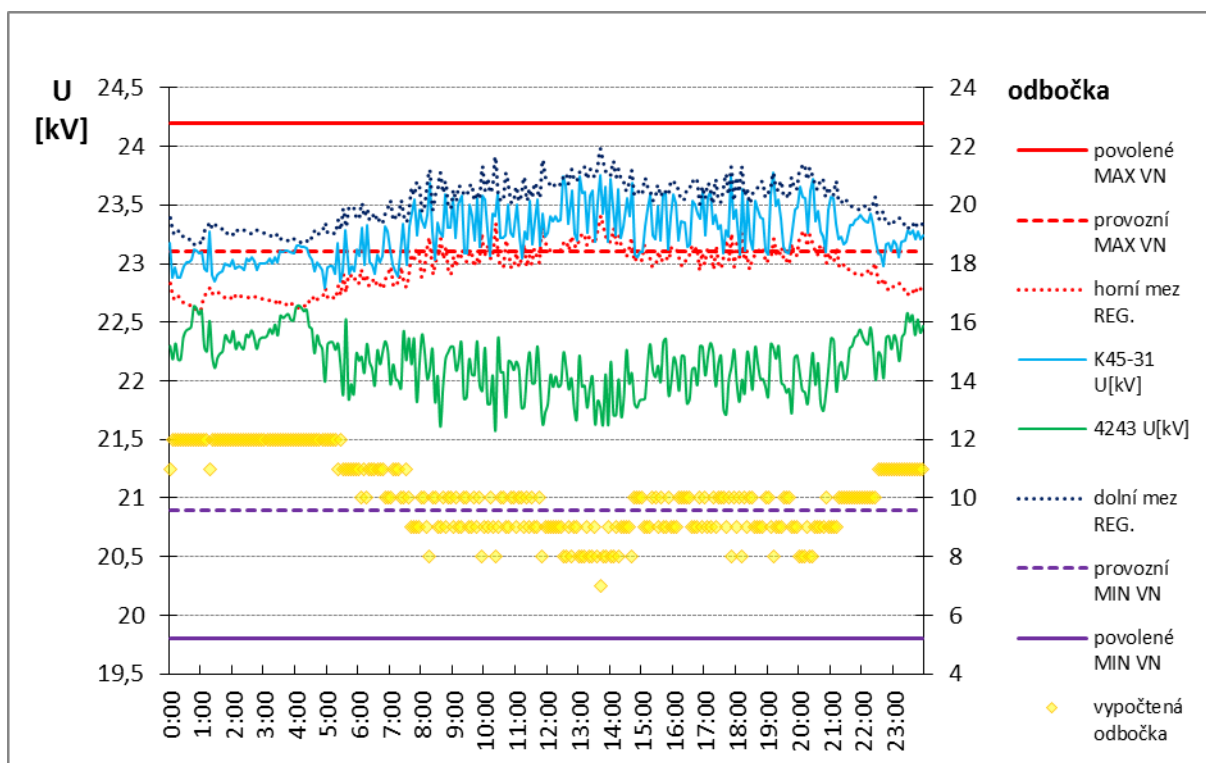


Obr. 30: Výpočet pro kabelové vedení AKCEVCEY o celkové délce 25km

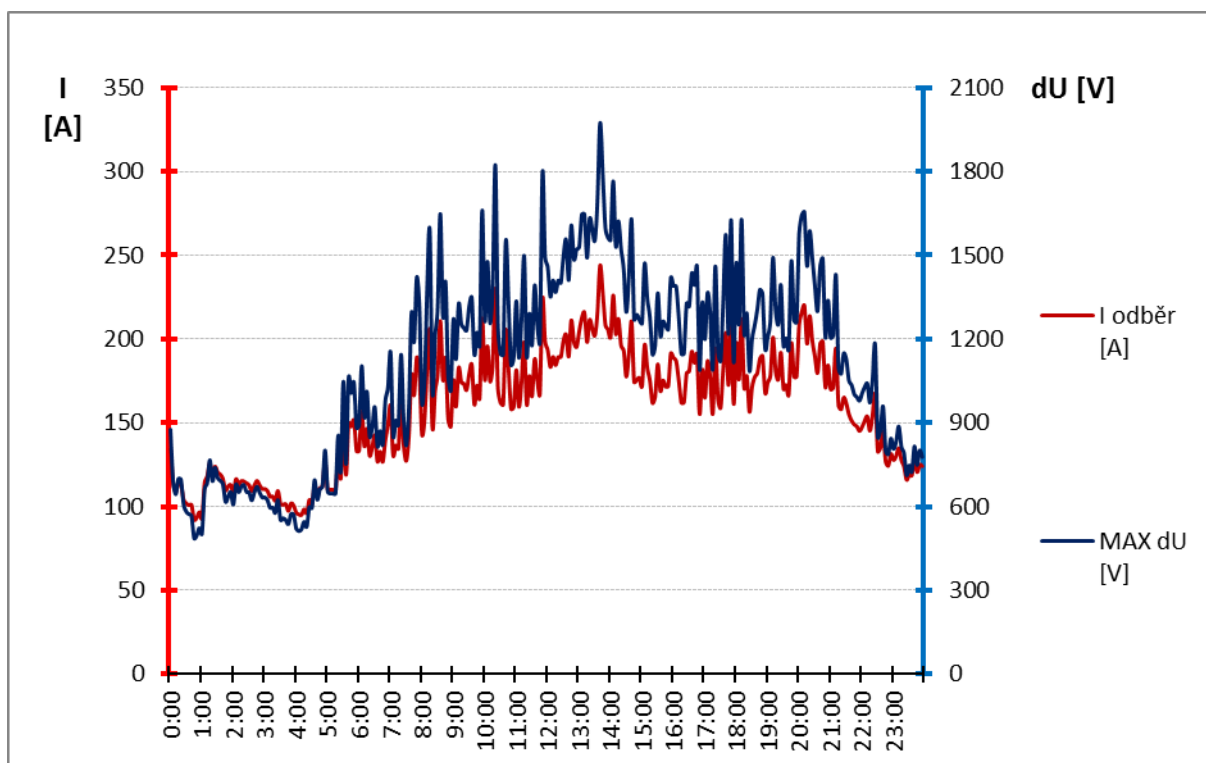


Obr. 31: Zatížení vývodu a maximální úbytek napětí na kabelovém vedení pro odběr 10MW

### 6.1.3. Vliv zavedení kompaundace u regulátoru U



Obr. 32: Výpočet s kompaundací pro kabelové vedení AKCEVCEY 25km



Obr. 33: Zatížení vývodu a maximální úbytek napětí pro odběr 10MW s kompaundací

## 6.1.4. Vyhodnocení

Varianta:		1		2a		2b		3	
Popis:		referenční vývod K45-31		venkovní vedení 12km ALFe90		kabelové vedení 25km AXEKVCEY		kabelové vedení 25km s KOMPAUNDACÍ	
Veličina:		min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
TRAFO	P [MW]	7,5	21,5	13,1	37,6	13,1	37,6	13,1	37,6
	Q [MW]	-2,6	0,6	-4,6	1,1	-4,6	1,1	-4,6	1,1
	I2 [A]	206,4	544,5	352,2	965,2	352,2	965,2	345,5	915,0
	U2 [kV]	22,2	22,7	22,2	22,7	22,2	22,7	22,8	23,8
	vypočtená odbočka	11,0	14,0	9,0	13,0	9,0	13,0	7,0	12,0
	rozsah regulace	4		5		5		6	
VÝVOD	P odběr [MVA]	2,0	5,7	1,8	5,0	3,5	10,0	3,5	10,0
	Q odběr [MVar]	-0,7	0,1	-0,6	0,1	-1,2	0,3	-1,2	0,3
	P dodávka [MVA]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Q dodávka [MVar]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	I odběr [A]	53,1	146,9	47,0	128,7	93,9	257,4	92,1	244,0
	U na konci [kV]	21,9	22,6	20,9	22,4	20,2	22,2	21,6	22,6
	Největší dU [V]	65,0	261,8	319,9	1416,0	496,6	2111,0	486,3	1973,9

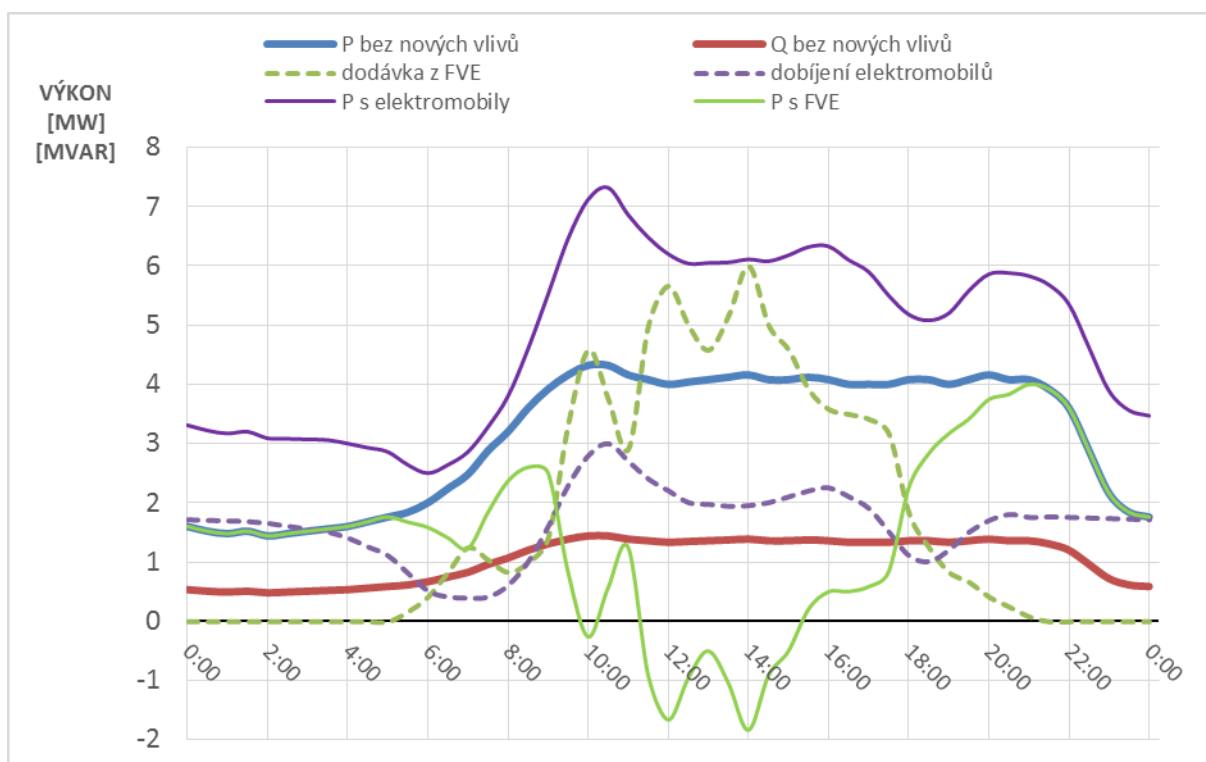
Obr. 34: Přehled nejdůležitějších výsledků pro DS bez uvažování vlivu nových trendů

Jak je vidět na výsledcích prezentovaných veličin, pohybuje se zatížení TR T102 R Běchovice ve sledovaném období (stejně tak jako po většinu roku při "normálním" provozním stavu) v dolní polovině instalovaného výkonu. Stejně tak zatížení na referenčním vývodu K45-31 nepřekračuje hodnotu 6MW v době maximální špičky. To má za následek, že regulace TR probíhá v relativně úzkém rozsahu maximálně 4 odboček (jedná se o regulaci vypočtenou modelem a skutečný regulátor využívá dokonce jen tři odbočky). Dodávka na referenčním vývodu (stejně tak, jako na všech ostatních vývodech, pro které jsem analyzoval data) je nulová a proud vstupující do napájecí linie nepřekračuje v době maxima hodnotu 150A. Tomu odpovídá i malý rozptyl hodnot napětí na začátku (interval 22,2 až 22,7kV) a na konci (interval 21,9 až 22,6) této reálné linie s rozptylem maximálního úbytků napětí v intervalu od 65 do 262V.

V ostatních případech, kdy jsem úmyslně zvedl odběr (až 10MW), nebo změnil parametry napájecí linie tak, abych se přiblížil k maximální přenosové schopnosti a zatížení TR, už dosahují mnohonásobně větších hodnot (např. rozptyl úbytků napětí se pohybuje v rozmezí 500V až 2,1kV). V těchto případech už začíná být zajímavá možnost využití kompaundance, která však není vhodná pro všechny případy. Jak je totiž vidět na příslušných grafech může dojít k překračování horních limitních hodnot a proto je třeba posuzovat vhodnost zavedení této funkce individuálně pro každý případ zvlášť.

## 6.2. DS PREDi s uvažování nových trendů

Vzhledem k tomu, že pro tyto případy zatím nejsou k dispozici potřebná data, sestavil jsem si na základě odborných odhadů (nárůst činného výkonu o 2MW vlivem elektromobility a maximální dodávka 6MW z FVE) vlastní průběhy. Hodnoty, kterých nabývají v průběhu dne a s nimiž dále pracuji pro uvažovaný referenční vývod K45-31, jsou vyneseny v následujícím grafu:

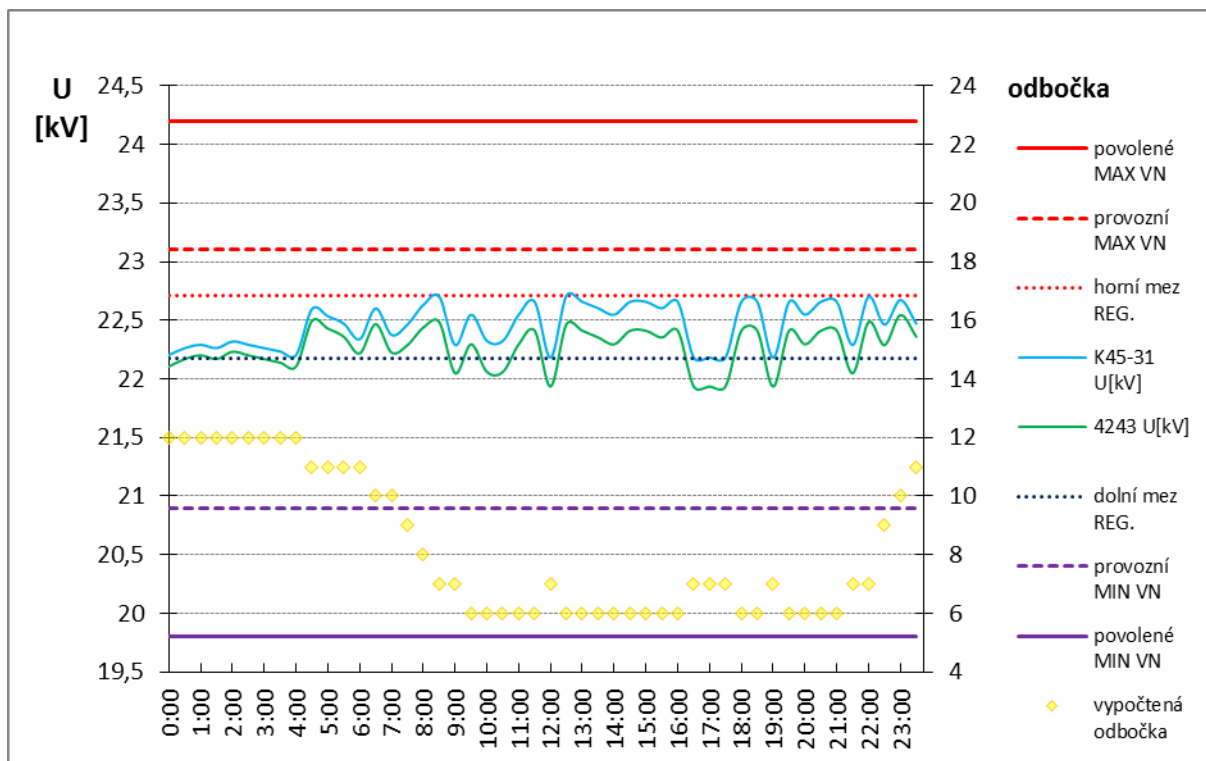


Obr. 35: Průběhy spotřeby a odběru při uvažování nových vlivů

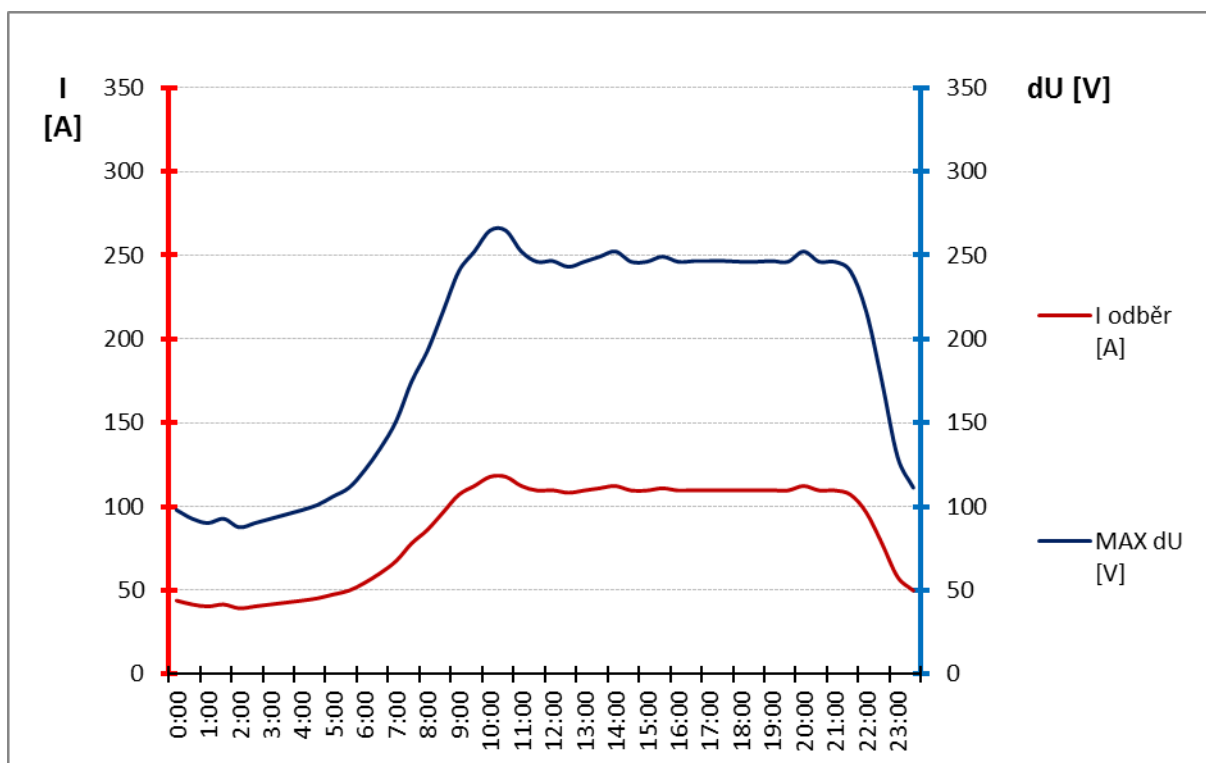
Na základě těchto předpokladů jsem zpracoval následující scénáře:

4. Průběh regulace napětí a výpočet chodu sítě pro referenční vývod bez uvažování nových vlivů.
5. Průběh regulace napětí a výpočet chodu sítě při uvažování nových vlivů:
  - a. nárůst odběru na vývodu vlivem dobíjení elektromobilů,
  - b. změny v odběru vlivem dodávky výkonu z FVE (maximální dodávka 6MW),
  - c. dvojnásobný nárůst dodávky z FVE oproti předpokladu (stejný průběh jako v předchozím případě, ale maximální dodávka 12MW),
  - d. dvojnásobný nárůst dodávky z FVE oproti předpokladu na kabelové linii 25km.

## 6.2.1. Referenční vývod bez vlivu nových trendů

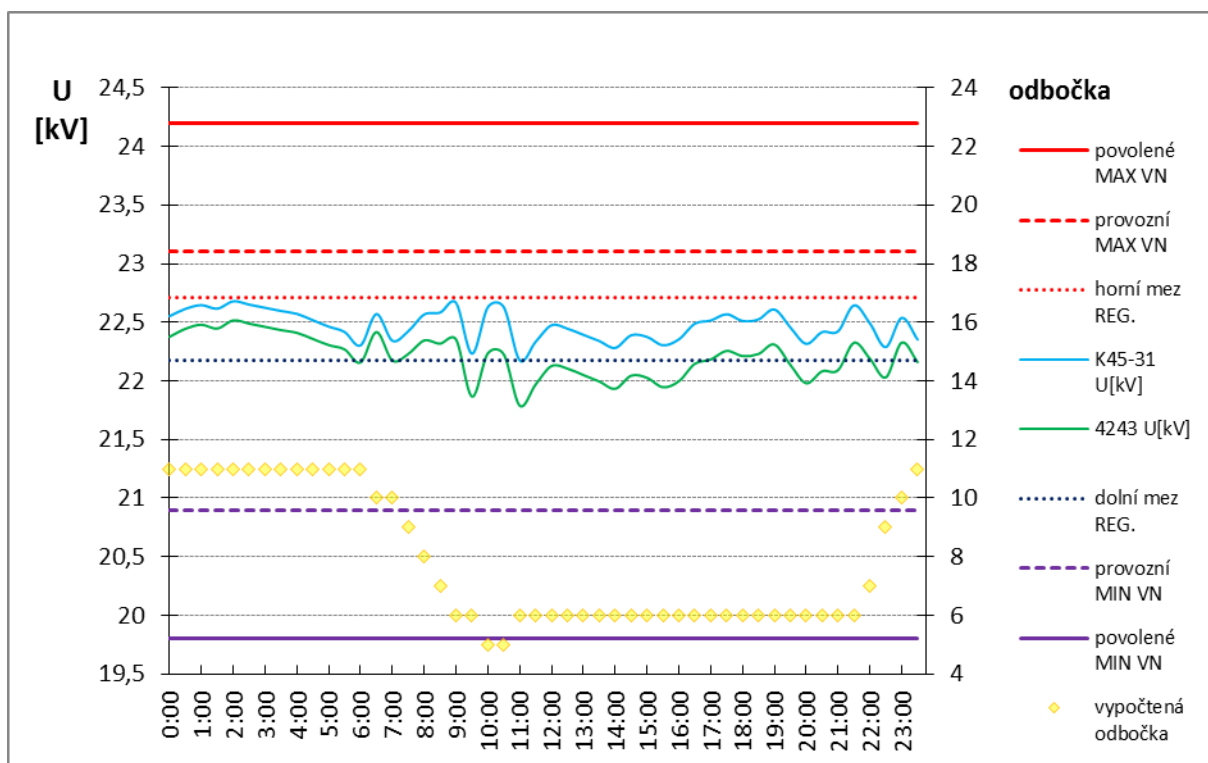


Obr. 36: Výpočet pro referenční vývod a denní vývod bez nových vlivů

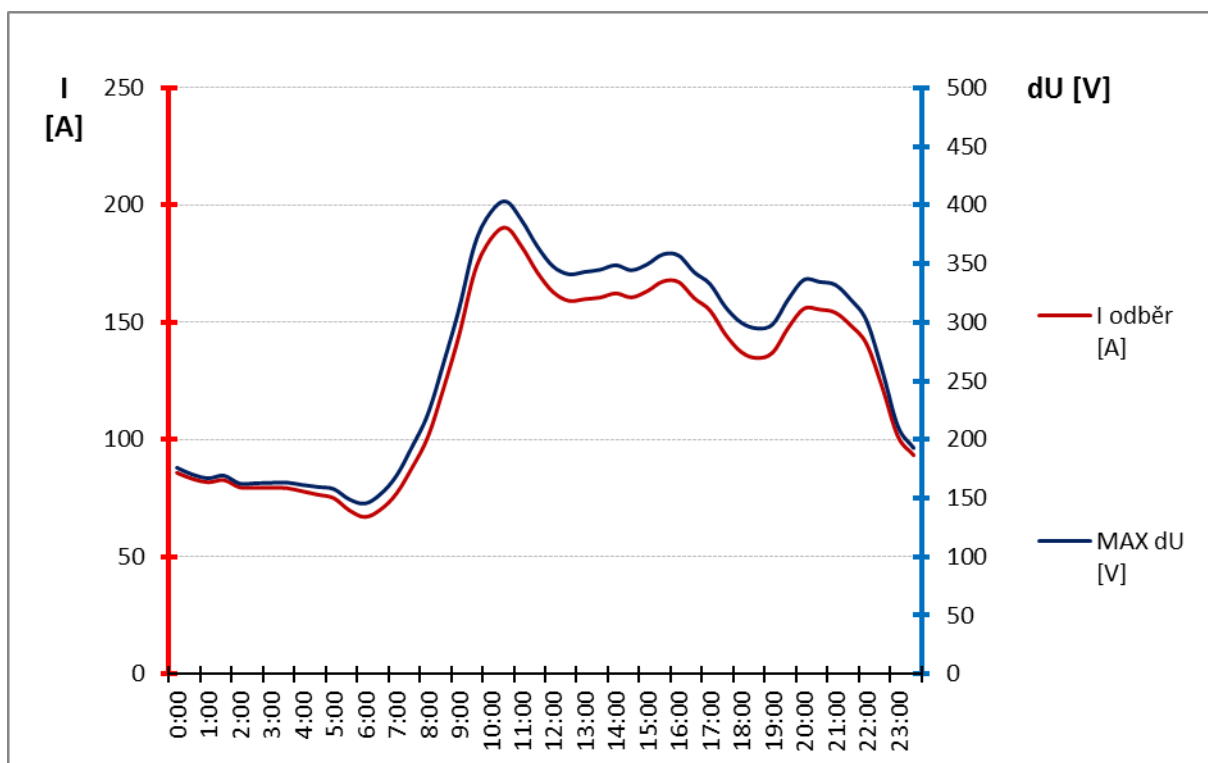


Obr. 37: Zatížení vývodu a maximální úbytek napětí bez uvažování nových vlivů

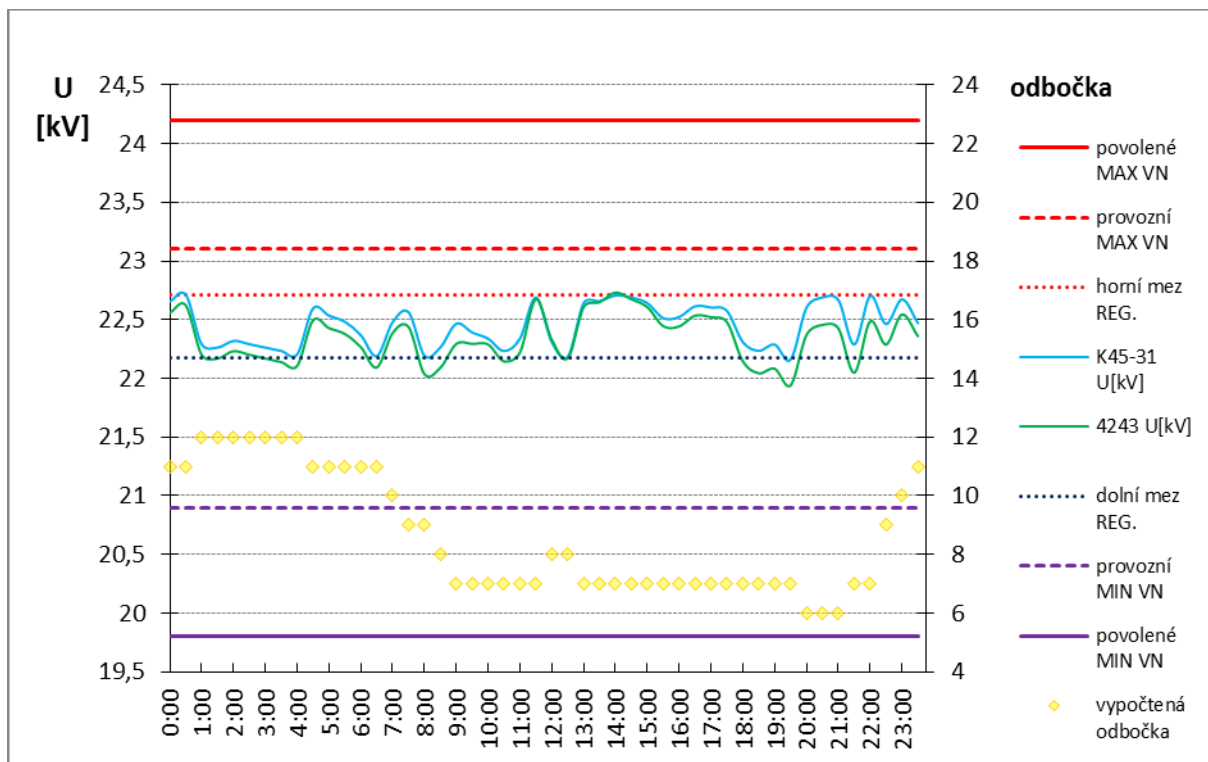
## 6.2.2. Referenční vývod s uvažováním nových trendů



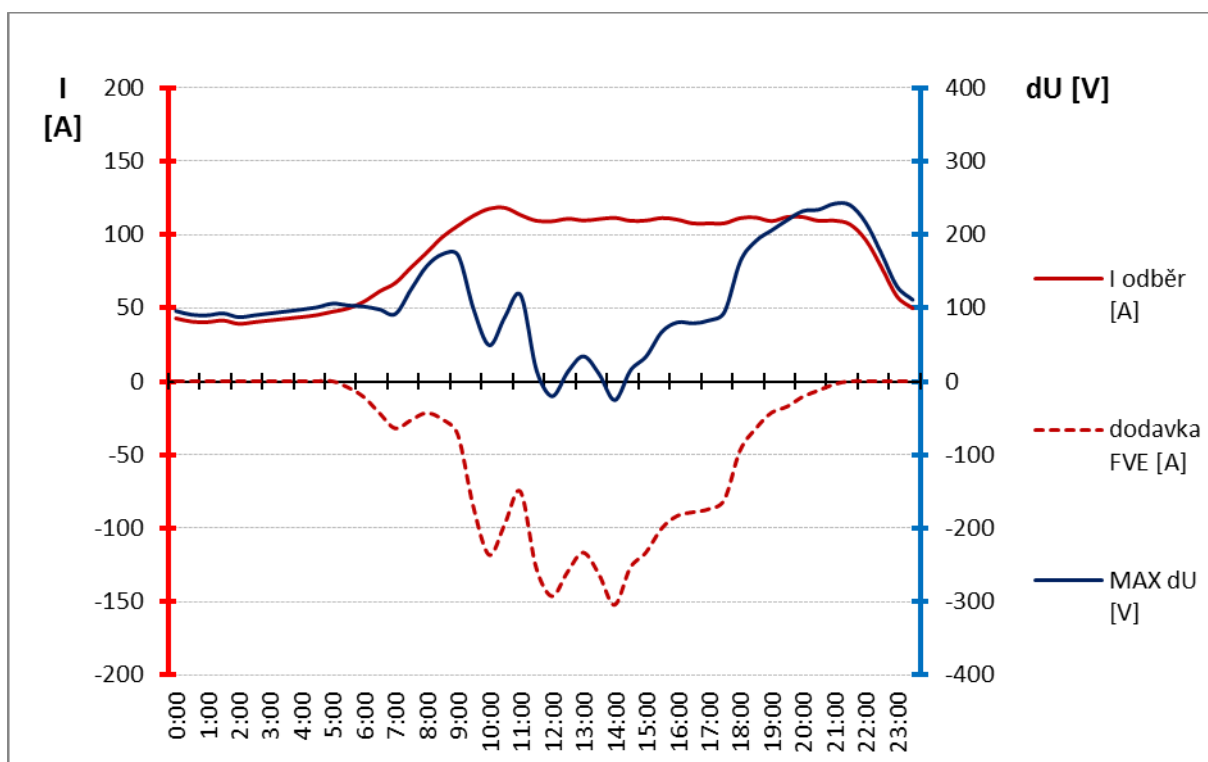
Obr. 38: Výpočet pro referenční vývod s uvažováním rozvoje elektromobility



Obr. 39: Zatížení vývodu a maximální úbytek napětí s uvažováním rozvoje elektromobility

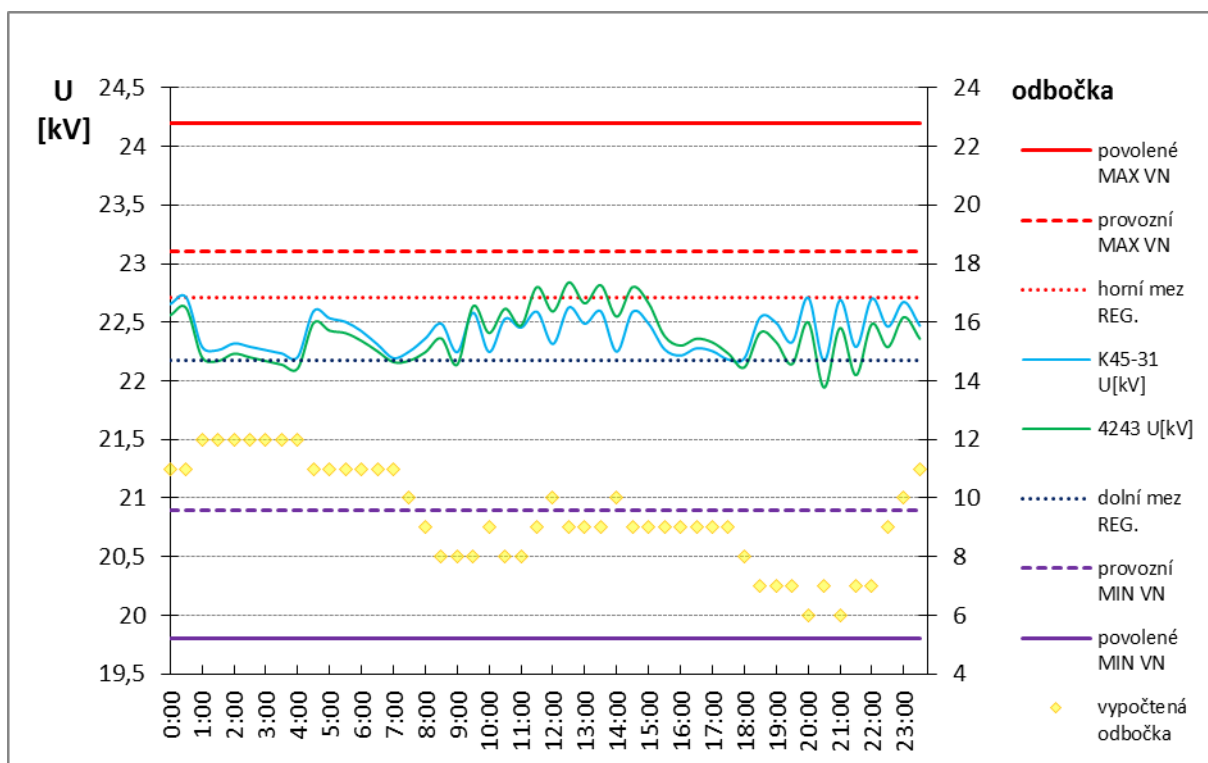


Obr. 40: Výpočet pro referenční vývod s uvažováním rozvoje FVE

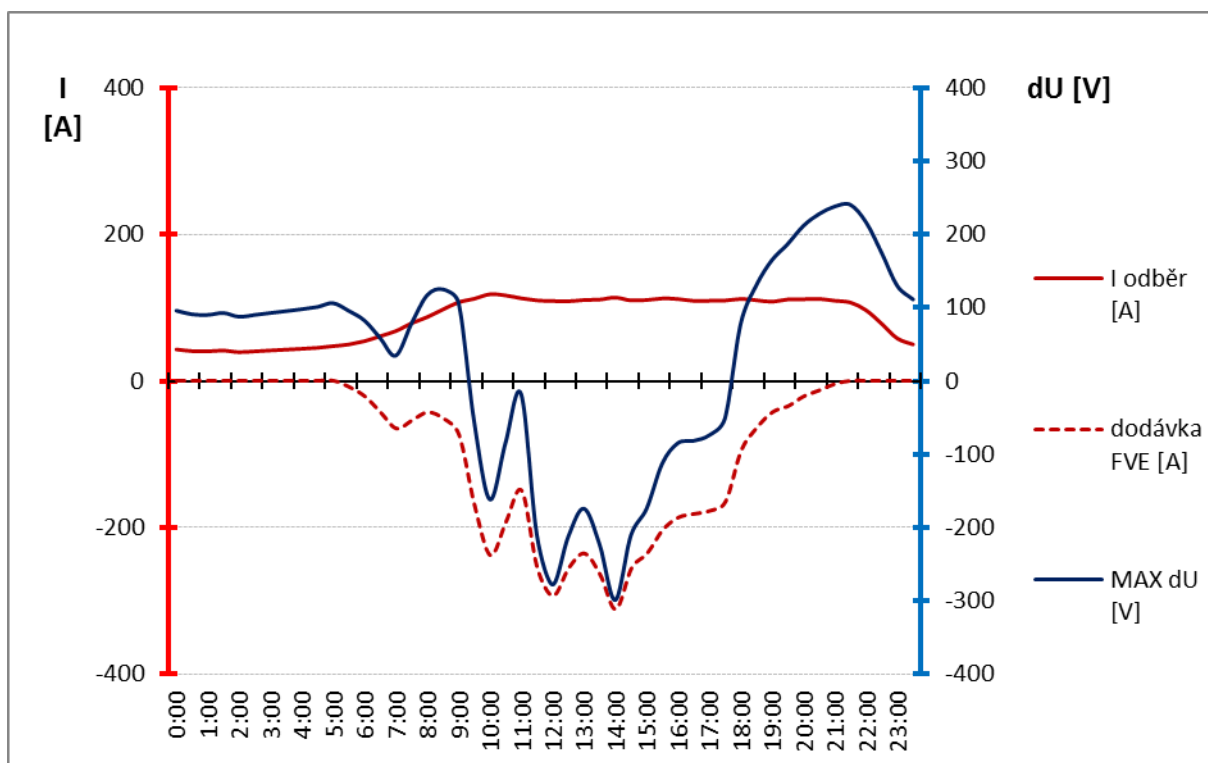


Obr. 41: Zatížení vývodu a maximální úbytek napětí s uvažováním rozvoje FVE

### 6.2.3. Limitní stavy s uvažováním nových trendů

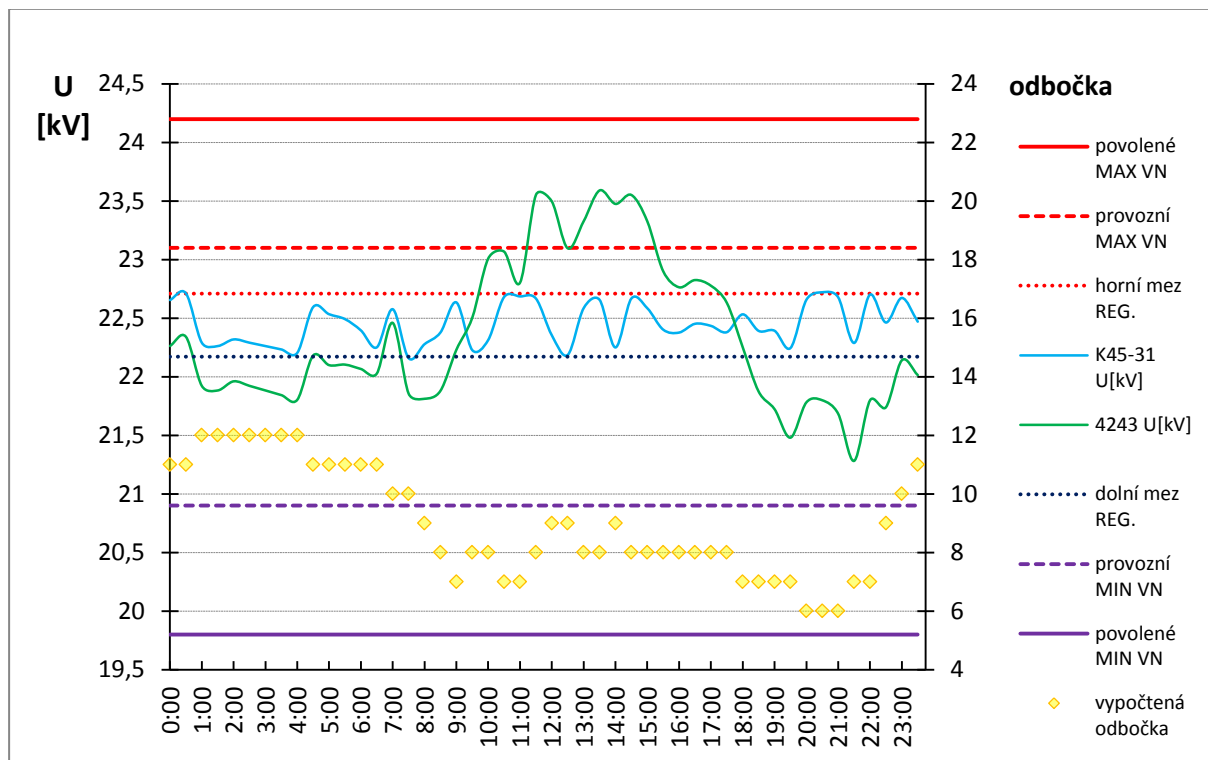


Obr. 42: Výpočet pro referenční vývod s uvažováním 2x většího rozvoje FVE

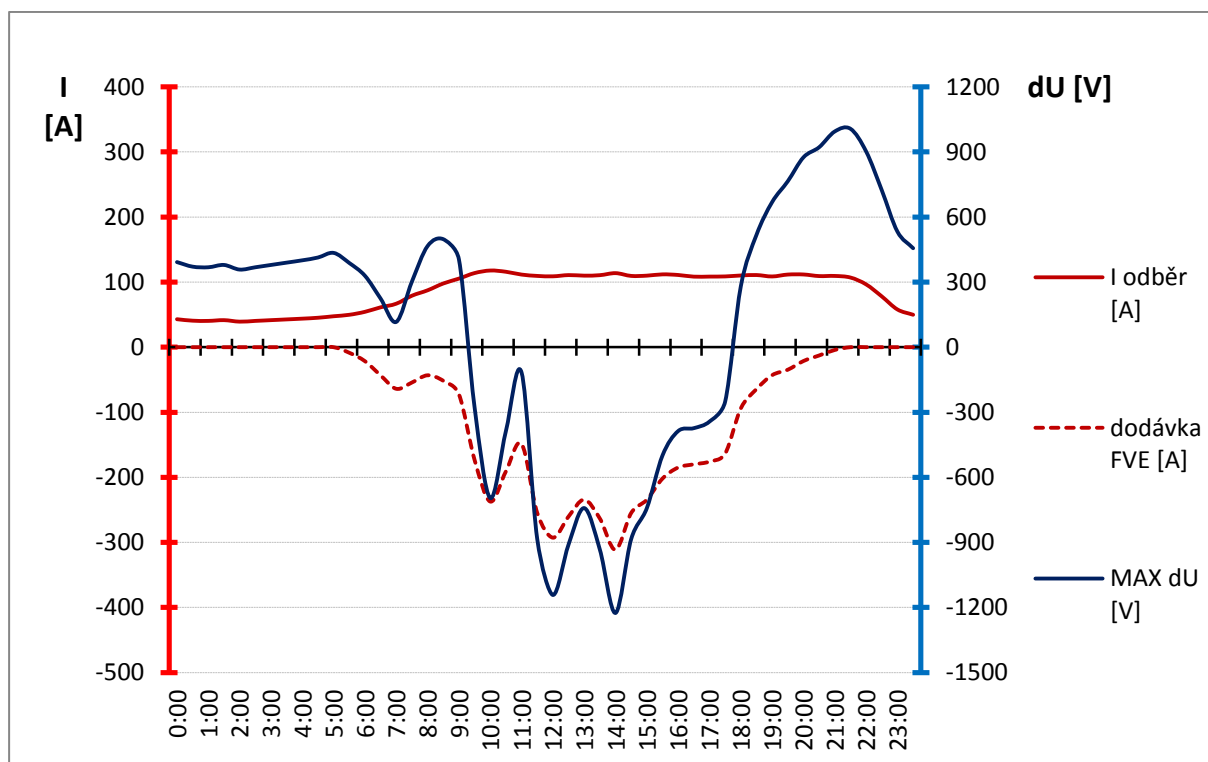


Obr. 43: Zatížení vývodu a maximální úbytek napětí s uvažováním 2x většího rozvoje FVE





Obr. 44: Výpočet pro vývod 25km AXEKVCEY s uvažováním 2x většího rozvoje FVE



Obr. 45: Zatížení vývodu 25km a maximální úbytek napětí s uvažováním 2x většího rozvoje FVE

## 6.2.4. Vyhodnocení

Varianta:		4		5a		5b		5c	
Popis:		referenční vývod bez OZE a elektromobilů		referenční vývod s elektromobily		referenční vývod s FVE (max. 6MW)		referenční vývod s FVE (max. 12MW)	
Veličina:		min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
TRAFO	P [MW]	12,6	37,8	14,3	40,0	12,6	36,0	12,6	35,5
	Q [MW]	4,2	12,6	4,2	12,6	4,2	12,6	4,2	12,6
	I2 [A]	339,7	1019,2	380,0	1072,8	339,7	971,4	339,7	956,6
	U2 [kV]	22,2	22,7	22,2	22,7	22,2	22,7	22,2	22,7
	vypočtená odbočka	6,0	12,0	5,0	11,0	6,0	12,0	6,0	12,0
	rozsah regulace	7		7		7		7	
VÝVOD	P odběr [MWA]	1,4	4,3	2,5	7,3	1,4	4,3	1,4	4,3
	Q odběr [MVar]	0,5	1,4	0,5	1,4	0,5	1,4	0,5	1,4
	P dodávka [MWA]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	0,0	12,0
	Q dodávka [MVar]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	I odběr [A]	39,3	117,8	67,0	190,3	39,3	118,2	39,3	118,2
	dodávka FVE [A]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	152,6	0,0	311,4
	U na konci [kV]	21,9	22,5	21,8	22,5	21,9	22,7	21,9	22,8
	Maximální dU [V]	87,6	264,8	145,4	403,0	-25,5	242,1	-299,2	240,4
<b>Varianta:</b>		<b>5d</b>							
Popis:		kabelové vedení AXEKVCEY 25km s FVE							
Veličina:		min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
TRAFO	P [MW]	12,6	35,6						
	Q [MW]	4,2	12,6						
	I2 [A]	339,7	961,3						
	U2 [kV]	22,2	22,7						
	vypočtená odbočka	6,0	12,0						
	rozsah regulace	7							
VÝVOD	P odběr [MWA]	1,4	4,3						
	Q odběr [MVar]	0,5	1,4						
	P dodávka [MWA]	0,0	12,0						
	Q dodávka [MVar]	0,0	0,0						
	I odběr [A]	39,3	117,8						
	dodávka FVE [A]	0,0	311,4						
	U na konci [kV]	21,3	23,6						
	Maximální dU [V]	-1225,3	1006,8						

Obr. 46: Přehled nejdůležitějších výsledků pro DS s uvažování vlivu nových trendů

První případ výpočtu, varianta 4 je bez uvažování nových vlivů. Slouží v podstatě jen k ověření správnosti výpočtu pro předpokládané hodnoty a průběhy. Proud, odběr i maximální úbytek napětí na napájecí linii se pohybuje v podobných intervalech, jako je tomu v předchozí kapitole, kde jsem pracoval se skutečnými hodnotami měřenými v průběhu vybraného dne. Vzhledem k většímu předpokládanému zatížení TR v tomto případě, je zde vidět rovněž větší rozsah odboček, s nimiž regulátor pracuje.

Varianta 5a demonstruje změny, k nimž dojde vlivem zvýšení odběru při předpokládaném dobíjení elektromobilů. Došlo k očekávanému nárůstu úbytku napětí mezi počátkem a koncem napájecí linie a rovněž regulátor (který se vzrůstajícím odběrem snižuje odbočky), se častěji drží častěji na šesté odbočce, než je tomu v případě varianty 4. Nicméně tak jako v předchozí kapitole, nejsou hodnoty napětí ani regulace nijak kritické a není potřeba je při normální provozu řešit.

Podobně jsou na tom rovněž průběhy ve variantě 5b, vynášené veličiny také nedosahují kritických hodnot a není potřeba je za běžného stavu řešit. Je zde však už vidět dopad dodávky z FVE, kdy v případě maxima dosahuje hodnota napětí na konci vedení úrovně na začátku vedení. Z druhého grafu je patrné, že úbytek napětí na napájecí linii je mezi 11 až 15 hodinou dokonce dvakrát záporný. To znamená, že napětí na linii neklesá, ale vlivem dodávky narůstá a může ovlivňovat napětí až na TR 110/22kV.

Tento jev je ještě více viditelný ve variantě 5c, která se od předchozího případu liší jen tím, že dodávka z FVE je dvojnásobná. Záporný úbytek napětí na konci napájecí linie dosahuje hodnoty až 300V, čímž výrazně ovlivňuje samotný průběh regulace. Zatímco v původním případě se v době maximální dodávky z FVE (mezi 11 a 15 hodinou) pohyboval regulátor na odbočce 6, výjimečně 7, tak v tomto případě je to odbočka 8 až 10.

## 7. ZÁVĚR

Na základě provedených výpočtů a analýzy dat (model regulátoru i výsledky výpočtu chodu sítě, jsou jako samostatné přílohy součástí této práce) jsem dospěl k následujícím závěrům:

**Za současného stavu a podmínek provozování DS PREDi**, kdy se efektivita využití TR 110/22 pohybuje okolo 50% nominálního výkonu, **je provozovaný způsob regulace napětí zcela postačující**. Vzhledem k malé impedanci kabelové sítě a relativně konstantní hodnotě napětí na hladině 110kV je rozsah regulace minimální (přepíná se maximálně mezi třemi odbočkami). Za těchto podmínek regulátory, i bez využití proudové kompaundace (umožňující kompenzaci úbytku napětí na vedení) dokáží napětí udržet v zadaných mezích. Hodnota napětí na konci vedení (od 21,9 do 22,6kV) v těchto případech s velkou rezervou splňují limity dané požadavky na kvalitu.

**U limitních stavů**, kdy napájecí linie dosahuje maximální uvažované délky 25km (15km AXEKVCEY 240 + 10km AXEKVCEY 120) a zároveň přenáší 90% výkonu (10MW) až do posledního uzlu, **může v době špičky dojít k poklesu napětí pod doporučené provozní minimum**. Tato hodnota je určena provozovatelem DS a napětí pořád ještě splňuje požadavky dané normou ohledně kvality, nicméně rezerva je v těchto případech jen minimální. **S využitím proudové kompaundace, lze dosáhnout zlepšení stavu** a hodnotu napětí na konci linky zvednou z rozsahu 20,2 až 22,2kV na 21,6 až 22,6kV. **Je však třeba, dát pozor na překročení horní meze** limity dané požadavky na kvalitu napětí - na začátku linie, se totiž pohybuje v rozsahu 22,8 až 23,8kV což překračuje doporučené provozní maximum 23,1 a blíží se hranici 24,2 dané normou. Proto je třeba, při posouzení vhodnosti využití této funkce, postupovat individuálně a zvážit zda není lepší využít jiné možnosti (kompenzátory, regulaci Q).

Při uvažování dopadů nových vlivů jsem pracoval hlavně s nárůstem odběru v důsledku dobíjení elektromobilů a to o 2MW a dodávkou z malých FVE, které by v době špičky do dané linie dodávali maximálně 6MW.

Vzhledem k tomu, že při velkém rozšíření elektromobilů, lze předpokládat souběh hlavně při "pomalém dobíjení" 10A / 230V v průběhu noci ("rychlé" 400A spíš jen výjimečně v době odpolední špičky) jedná se v tomto případě o klasický nárůst požadavků na odběr. K tomu by mělo docházet hlavně v nočních hodinách, takže tento dopad by neměl představovat žádné větší riziko. Následky budou v podstatě shodné s obdobnými případy nárůstu odběru, bez posuzování nových vlivů. Regulace bude pracovat s větším rozsahem odboček, které se v limitních případech mohou častěji blížit ke krajním hodnotám. Při

současném stavu a způsobu provozování DS je však regulační rezerva stále ještě dostatečná. Hodnoty napětí na takto zatížené linii budou samozřejmě se vzrůstajícím zatížením klesat, přesto by však neměli dosáhnout limitních mezí ať už provozních či povolených normou.

**Nejkritičtější může být situace v případě nárůstu dodávky způsobené rozvojem malých FVE.** V závislosti na hodnotě dodávaného výkonu může docházet k situacím, při nichž bude úbytek napětí na vedení dosahovat záporných hodnot (napětí na konci napájecí linie bude větší než na začátku). V případě předpokládaného rozvoje těchto zdrojů (jiné OZE než FV panely a kogenerační jednotky nemá cenu na území Hlavního města Prahy uvažovat), kdy uvažují 4MW odběr a maximálně 6MW dodávku, není situace stále ještě kritická. **Pokud by ale došlo k dvojnásobnému nárůstu dodávky z FVE v linii nebo dodávky FVE v celé oblasti napájené uvažovaným TR jsou dopady na regulaci TR již hodně viditelné.** Dochází k překročení horních regulačních i provozních limitů a situaci bude třeba vhodným způsobem řešit. Například volbou rozdílných regulačních mezí v případě dodávky a v případě odběru, tak je to umožňují novější regulátory.

## Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] Předpis číslo **458/2000 Sb.** o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (**energetický zákon**)  
<http://portal.gov.cz/app/zakony/zakonPar.jsp?idBiblio=49962&nr=458~2F2000&rpp=15#local-content>
- [2] Petr TOMAN, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR, David TOPOLÁNEK a kol. / **Provoz distribučních soustav** - České vysoké učení technické v Praze, Praha 2011  
[http://k315.feld.cvut.cz/CD\\_MPO/CVUT-7-Provoz.pdf](http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-7-Provoz.pdf)
- [3] Provozovatel přenosové soustavy na území České republiky – společnost ČEPS, a. s.  
<https://www.ceps.cz/CZE/Stranky/default.aspx>
- [4] Veřejně publikované dokument schválený ERU (včetně všech jeho příloh) s informacemi a závaznými pravidly pro účastníky trhu (v aktuálním znění)  
<https://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Stranky/default.aspx>
- [5] Josef TLUSTÝ, Jan KYNCL, Ladislav MUSIL, Jan ŠPETLÍK, Jan ŠVEC, Petr HAMOUZ, Miroslav MÜLLER, Zdeněk MÜLLER / **Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav** - České vysoké učení technické v Praze, Praha 2011  
[http://k315.feld.cvut.cz/CD\\_MPO/CVUT-5-Monitorovani.pdf](http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-5-Monitorovani.pdf)
- [6] **ČSN EN 50160 ED.3 (330122)** / Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí
- [7] Josef TLUSTÝ, Jan ŠVEC, Petr BANNERT, Zbyněk BRETTSCHEIDER, Zbyněk KOCUR, Petr MAREČEK, Zdeněk MÜLLER a Tomáš SÝKORA / **Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí** - České vysoké učení technické v Praze, Praha 2011  
[http://k315.feld.cvut.cz/CD\\_MPO/CVUT-4-Navrh\\_siti.pdf](http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-4-Navrh_siti.pdf)
- [8] Manuál a technický popis / **Regulátor napětí SPAU 341 C** - ABB Automation
- [9] Provozní návod / **Regulátor napětí VC 100-BU** - MR Reinhausen Germany
- [10] Návod k obsluze / **Automat HRT 6** - ORGREZ, a. s., 1999
- [11] Doc. Ing. František NĚMEČEK, CSc. / **Přenos a rozvod elektrické energie** – České vysoké učení technické v Praze, červenec 1983

[12] GRYM, HOCHMAN, MACHOŇ, CHMELÍK, HANUŠ, TOMAN / **Chránění III, energetická zařízení vysokého napětí** – IRIS 2005

[13] Prezentace od zástupců firmy MR, autor Dipl. Ing. (FH) Erich STEINDL / **Nová HW platforma pro sběr dat společnosti MR - MONITORING & MANAGEMENT** – pracovní setkání LIMBACH, Slovensko 2014

[14] Podklady a materiály pro studenty ČVUT FEL z oboru Elektroenergetika / **Řízení energetických soustav (X15RES) - přílohy ke cvičení 1 a 2**  
<https://www.powerwiki.cz/wiki/X15RES>

[15] **Interní aplikace** (NETAN, GIS, atd.), **databáze a zdroje** (provozní zprávy, dispečerské deníky, archivní záznamy měřených hodnot z ŘS R100/22Kv) provozovatel distribuční sítě **PREdistribuce, a. s.**  
<http://www.predistribuce.cz>