

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Omezení rizik vzniku poruchy typu „Blackout“ použitím
transformátorů s příčnou regulací fáze**

vedoucí práce: Doc. Ing. Jiřina Mertlová, CSc.

autor: Bc. Petr Budař

2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr BUDAŘ**
Osobní číslo: **E13N0001K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Omezení rizik vzniku poruchy typu "Blackout" použitím transformátorů s příčnou regulací fáze**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište funkci přenosové soustavy.
2. Popište funkci transformátoru s příčnou regulací fáze, nebo transformátoru pro regulaci fáze.
3. Popište důvody přetěžování přenosových soustav.
4. Uveďte, jaké jsou možnosti regulace přetoků elektrické energie s použitím transformátoru s příčnou regulací fáze (TPR), nebo transformátoru pro regulaci fáze (PST).
5. Proveďte simulaci působení TPR proti přetěžování linek na modelu PS.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

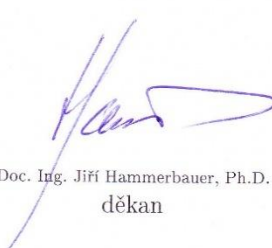
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

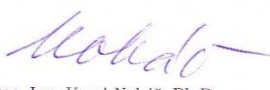
Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Jiřina Mertlová, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

V předkládané diplomové práci se zabývám popisem transformátoru s regulací fáze a jeho fungováním. Zpracoval jsem jeho využití v přenosové soustavě pro regulaci přetoků činného výkonu a jeho vliv na přenosové soustavy jednotlivých států UCTE. Vyhodnotil jsem, jaké jsou možnosti předcházení poruchy typu „Blackout“ s pomocí transformátorů s příčnou regulací fáze. Provedena je i simulace vlivu modelu transformátoru s regulací fáze na modelu přenosové soustavy. Zabýval jsem se taktéž poruchou typu „Blackout“ její historií nejen v Evropě a jejím průběhem. Vyhotovil jsem i krátké pojednání o sociálním dopadu této poruchy na společnost.

Klíčová slova

Transformátor, PST, regulace fáze, Blackout, přenosová soustava, UCTE,

Abstract

In my thesis I describe the phase shift transformer and its function. I worked up its utilization in the transmission system for the regulation of the active power overflows and its influence on the transmission systems of the individual states of the Union for the Coordination of Transmission of Electricity (UCTE). I evaluated possibilities how to prevent power blackout with the help of the phase shift transformer. I also performed a simulation of the influence of the phase shift transformer model on the transmission system model. As well I described power blackout and its history not only in Europe and its development. Shortly I also dealt about the social impact of this power failure on the society.

Key words

Transformer, PST, Phase shifting, Blackout, Transmission system, UCTE,

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 17. 3. 2015

Bc. Petr Budař

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Jiřině Mertlové CSc. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Taktéž panu Pokludovi za poskytnuté podklady, a panu Sítaři za rady ohledně programu Dynast.

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	9
1. Úvod.....	11
1.1 Historický vývoj elektrizační soustavy v ČR.....	12
1.1.1 CDO – soustava Mír	13
1.2 Elektrizační soustava ČR	15
1.2.1 Výroba elektrické energie.....	15
1.2.2 Přenosová soustava	16
1.2.3 Distribuční soustava.....	17
2. Prostředky pro regulaci toků výkonů v síti.....	18
2.1 Přehled možností regulace toku elektrické energie.....	19
2.1.1 HVDC	19
2.1.2 TCSC	19
2.1.3 UPFC	19
2.1.4 TPR a PST	20
2.1.5 Transformátor s regulací fáze	22
3. Důvody přetěžování přenosových soustav	24
3.1 Výpadky	25
3.2 Množství a příčiny výpadků v EU	25
3.3 Blackout – průběhy a dopady.....	25
3.3.1 Případy Blackoutů v Evropě.....	25
3.3.2 Výpadek z roku 2003 Itálie a Švýcarsko	26
3.3.3 Společenské dopady výpadků proudu.....	29
4. Možnosti předcházení Blackoutu s PST	29
5. Simulace PST proti přetěžování na modelu PS	30
5.1 Vedení	31
5.2 Parametry PST	31
6. Závěr	33
7. Seznam literatury	34
8. Přílohy.....	36

Seznam symbolů a zkratek

50HzT	– Německý provozovatel PS
APG	– Rakouský provozovatel PS
CDO PES	– Centrální dispečerská organizace propojených energetických soustav
CDO Soustava Mír	– Prvotní propojení PS zemí RVHP
CEER	– Rada evropských energetických regulátorů
CENTREL	– Uskupení provozovatelů PS států ČR, Slovenska, Polska a Maďarska
ČEPS, a.s.	– Česká přenosová soustava
ČEZ, a.s.	– České Energetické Závody
ČR	– Česká republika
ČSR	– Československá republika
DS	– Distribuční soustava
E.O.N, a.s.	– Výrobní a distribuční společnost v ČR
ENSO-E	– evropská síť provozovatelů PS
ERÚ	– Energetický regulační úřad
ES	– Elektrizace soustava
ETRANS	– Švýcarský provozovatel PS
„GRAMME“	– Jedno z prvotních použitelných dynam v energetice
GRTN	– Italský provozovatel PS
GTO	– Říditelný tyristor (Gate turn off)
NDR	– Německá demokratická republika
OZE	– Obnovitelné zdroje energie
PS	– Přenosová soustava
PSE	– Polský provozovatel PS
PST	– Phase Shifting Transformer (transformátor s příčnou regulací fáze)
PWM	– Pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
RVHP	– Rada vzájemné hospodářské pomoci
SEPS	– Slovenský provozovatel PS
TenneT	– Holandský provozovatel PS
TPR	– Transformátor s příčnou regulací

UCPTE/UCTE	– Unie pro koordinaci přenosu elektřiny
VVN	– Velmi vysoké napětí
ZVN	– Zvlášť vysoké napětí
P	– Činný výkon
Q	– Jalový výkon
U_1	– Napětí v uzlu 1
U_2	– Napětí v uzlu 2
X_V	– Reaktance vedení
X_{PST}	– Podélná reaktance PST
$\sin \delta$	– fázový posuv napětí mezi napětími uzlů 1 a 2
β	– přidavný regulační úhel PST

1. Úvod

Na počátku výroby elektrické energie v dobách T. A. Edisona a N. Tesly s pojmem „Blackout“ – výpadek, nikdo nepočítal, neboť lidská společnost na elektřině nebyla životně a společensky závislá. První městské elektrárny byly v podstatě ostrovní provozy, kdy napájely své nejbližší okolí elektřinou a ta byla používána především pouze ke svícení. V té době byly známy jen obloukové lampy a Edisonovy žárovky, kterým příliš nevadilo kolísavé napětí a frekvence v síti.



Obr.1. Nikolou Teslou nasvícené náměstí Chicaga r. 1893.[4]

Až později, s nástupem propojování jednotlivých elektráren do společné sítě, se začaly více řešit kvalitativní požadavky elektřiny a i kvantitativní požadavky, ruku v ruce se zvyšující se spotřebou.

V dnešní době je většina lidské společnosti životně a společensky závislá na elektrické energii a poptávka po ní roste. S tím však vzrůstá ruku v ruce i riziko poruchy typu „Blackout“ z různých důvodů. Těchto důvodů je několik, např.: výpadek velkého zdroje el. energie ze sítě; výpadek přenosové linky VVN, ZVN vlivem přetížení a jiné.

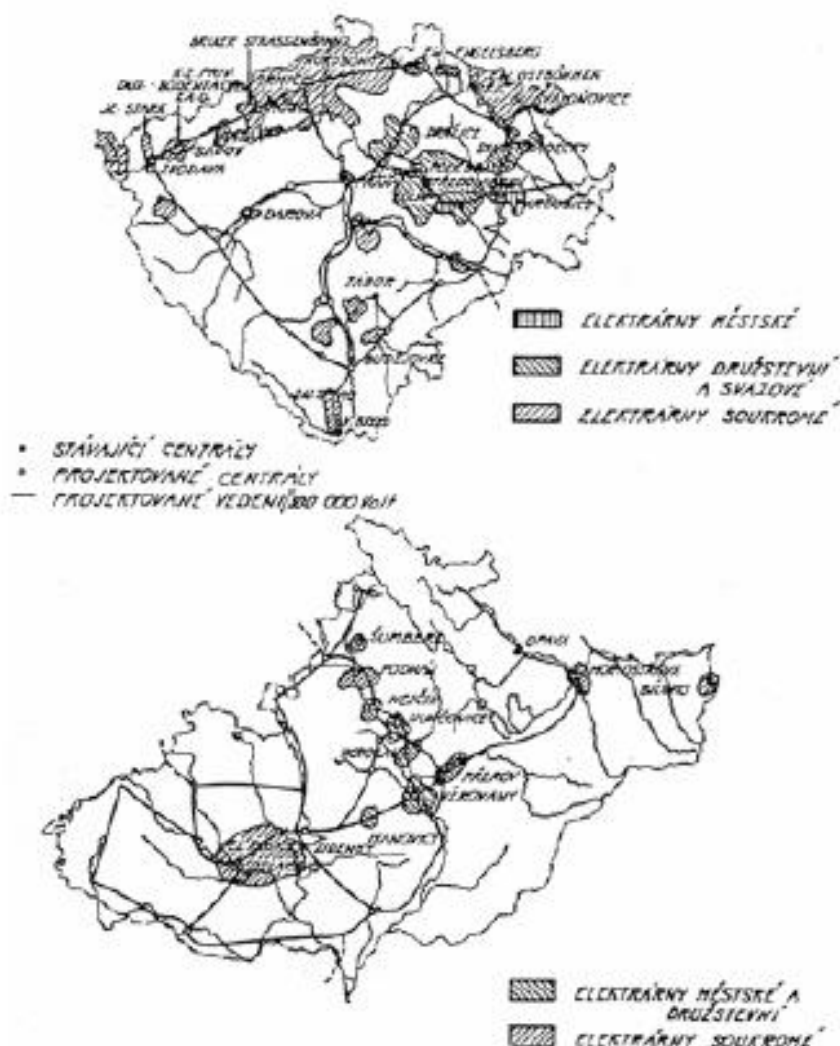
Je potřeba si vyjasnit pojem „Blackout.“ Jedná se o rozsáhlý výpadek elektřiny na určitém území, který se neomezuje státními hranicemi, a může třeba postihnout i celý stát (viz případ Itálie v r. 2003). Výpadek může trvat od několika minut až po několik dní, v podstatě není časově omezen. Záleží na příčině, rychlosti jeho odstranění, velikosti postiženého území, typu zdrojů elektrické energie v postižené oblasti tj. možnost nájezdu ze tmy atd.

Následky krátkodobého výpadku nejsou relativně veliké, životně důležité provozy, např. nemocnice mají vlastní zálohy – diesel-agregáty, kterými dokáží překlenout krátkodobý výpadek. Ale při dlouhodobém „Blackoutu“ hrozí nebezpečí kolapsu společnosti. Rozpad lidských hodnot v důsledku nedostatku základních potřeb, jako třeba pitné vody, jídla, léků, hromadné dopravy, pohonných hmot atd., protože téměř vše je propojeno s elektrickou energií.

Proto se snažíme zajistit plynulou dodávku elektrické energie bez přerušení vyhledáváním „slabých míst“ v ES a jejich následným posílením, případně přesměrováním výkonu jinými trasami. K tomuto účelu je například používán Phase Shifting Transformer – PST – transformátor s příčnou regulací fáze.

1.1 Historický vývoj elektrizační soustavy v ČR

Za počátky elektrizace a vzniku ES na území ČR se dá považovat instalace obloukových lamp v Moravské Třebové v tkalcovně lnu roku 1878. Pro jejich napájení bylo použito stejnosměrného dynama typu „Gramme“. Zavádění elektrické energie do měst, převážně do pražské aglomerace, je úzce spjato se jménem průmyslníka a českého elektrotechnika Františka Křižíka. V roce 1883 osvětlovaly Křižíkovy elektrické obloukové lampy Staroměstské náměstí. Postupně pokračovala elektrizace dalších objektů na území Čech. Výrobní zdroje přestaly sloužit pouze jejich zřizovatelům, ale vyráběná elektřina byla rozváděna, naprostou většinou venkovním vedením různých napěťových soustav, dalším odběratelům. [5,9,14]



Obr.2. České země s vyznačenými oblastmi s elektrárnami, přibližně rok 1918 [5]

V roce 1918 je ve vznikající ČSR elektrifikováno 11% měst a obcí s 34% obyvatel. O rok později je vydán tzv. „elektrizační zákon“ č. 438/1919 Sb. „O státní podpoře při zahájení soustavné elektrizace“. Bylo normalizováno síťové napětí 3x380V/220V, frekvence sítě 50Hz, napětí primárních distribučních sítí 22kV a 100kV. (25 všeužitečných elektrárenských společností). Prohlášením podniku za všeužitečný se mu přikazovala povinnost zásobovat

elektřinou na určitém území každého, kdo o to požádá, neprokáže-li se, že by připojení bylo nerentabilní. Současně s těmito povinnostmi dostaly všeužitečné společnosti značná práva a výhody. V první polovině dvacátého století už bylo jasné, kam se elektrárny bude ubírat. Trend jednoznačně směřoval k velkým propojeným podnikům, schopným pokrýt většinu požadavků společnosti. Tím, že vlastníky společností byl nejen stát, ale i místní samospráva a spotřebitelé, postupovala elektrizace velice rychle. Ta podpořila i český průmysl, který se na rozvoji energetiky a elektrizaci podílel. Na konci 20. let byl již elektrický proud přístupný 70 procentům obyvatelstva převážně ve městech. [2]

Ve třicátých letech byla pokračující elektrizace přerušena začátkem II. světové války. Jsou vystavěny velké elektrárny - Oslavany, Třebonice, Poříčí I., Mydlovary, Kolín, Andělská hora u Liberce, Brno – Špitálka, z nichž se většina nedochovala nebo po přestavbě slouží jako teplárny. Na konci 30. let již bylo elektrifikováno 70 procent všech obcí a k elektřině již mělo přístup 90 procent obyvatelstva, a to i přes hlubokou celosvětovou hospodářskou krizi (1929 – 1936), která brzdila ještě rychlejší postup elektrizace zejména v chudších oblastech a na venkově. Většina elektřiny je nadále spotřebovávána pro osvětlení, neboť domácí spotřebiče byly drahé a těžko dostupné. [2,7]

Po druhé světové válce byly zřízeny Československé energetické závody roku 1946, které zajišťovaly výrobu a rozvod elektřiny. Energetika přešla na plánované hospodářství. Oproti předchozím letům již není většina elektřiny spotřebovávána pro osvětlení, ale elektrickými spotřebiči, převážně motory. V českých zemích se objevoval nedostatek elektřiny, což řešil dovoz z Polska a zákaz přímotopů. [2]

Díky centrálnímu plánování tehdejšího socialistického zřízení republiky bylo už v letech 1954-55 dosaženo 100% elektrifikace území a obyvatel elektrickou energií. S kvalitou dodávané elektřiny to však nebylo valné. Přesto se výkony tehdejších elektráren díky modernizacím zvýšily dvojnásobně. Rozvíjela se taktéž výměna elektřiny s okolními státy. Byly zbudovány elektrárny sloužící do současnosti např. v Hodoníně, Poříčí II., Opatovicích, Tisové, Mělníce a Vltavská kaskáda - Lipno, Orlik, Štěchovice, Kamýk. Začala se však projevovat neefektivnost průmyslu a spotřeba rostla rychleji než výkon elektráren. V polovině padesátých let se začalo vyskytovat vypínání elektřiny pro domácnosti, nejprve zcela živelně, poté regulovaně tak, aby dodávky pro průmysl byly zajištěny. [2]

1.1.1 CDO – soustava Mír

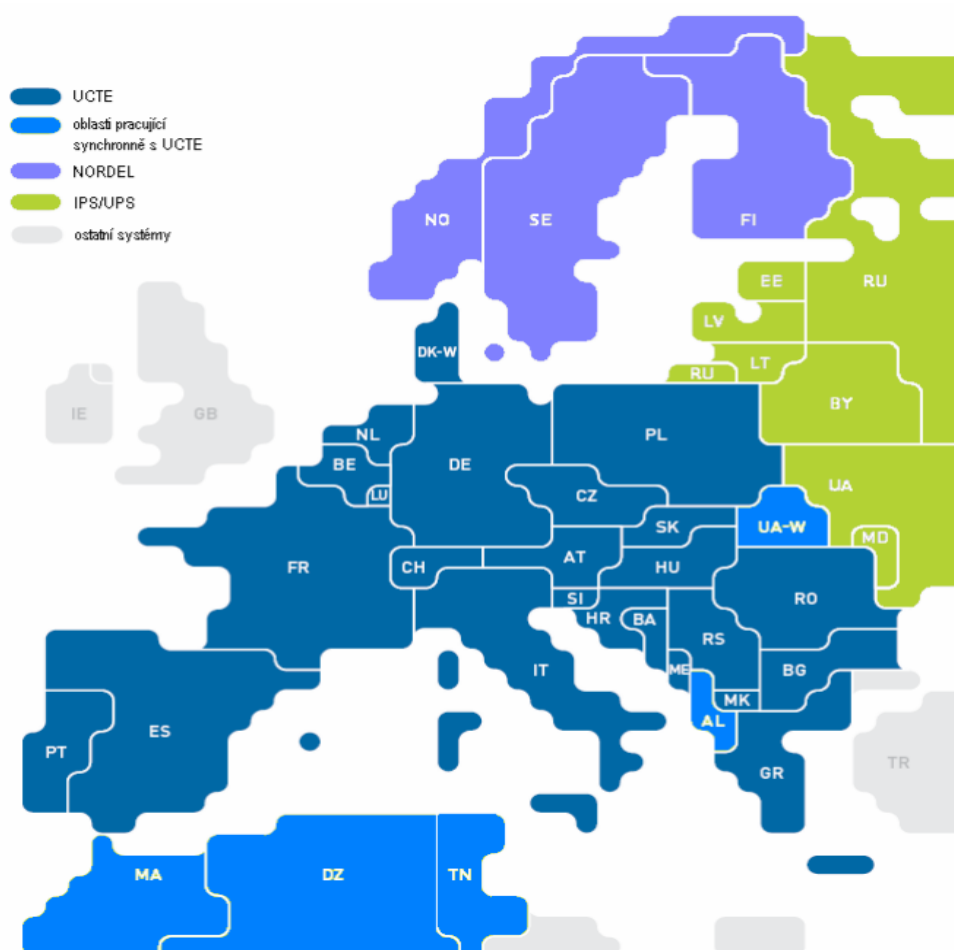
K první mezinárodní spolupráci v rámci bývalého RVHP došlo propojením Československa a Maďarska linkou 110kV v roce 1953 a linkou 220kV v roce 1960, což bylo prvním krokem k vytvoření propojené elektrizační soustavy Mír. Další spolupráce se vyvíjela v roce 1961 mezi soustavami Československa, Polska a bývalé NDR. 25. července 1962 vzniká Centrální dispečerská organizace propojených energetických soustav – CDO PES se sídlem v Praze. Do této organizace patřily elektrizační soustavy Československa, Maďarska, NDR, Polska a Západoukrajinská energetická soustava. V roce 1963 se připojilo Bulharsko a o rok později Rumunsko. V této době dochází k prudkému rozvoji energetiky jak ve výrobním sektoru, tak v rozšiřování přenosových sítí u nás i v zahraničí. [2,7]

V letech 1960 – 1970 se pokračovalo v budování elektrických sítí, především vedení o vyšších napětích, včetně mezinárodních propojek. V roce 1960 byl uveden do provozu první elektrárenský blok o výkonu 110MW elektrárny Tisová. Na konci šedesátých let došlo

k rozdělení Československých energetických závodů na České a Slovenské energetické závody. [2]

V dalším desetiletí pokračuje budování dalších velkých uhelných elektráren s bloky 200MW v oblasti severních Čech v blízkosti hnědouhelných dolů - Počeradý, Tušimice II., Chvaletice a Dětmárovice na severní Moravě. Plánované hospodářství se projevilo v energetice především v politice „levné elektřiny“. Mezi lety 1978 -79 je zahájen paralelní provoz Mír s přenosovou soustavou SSSR. Jsou vybudovány stejnosměrné spojky s Rakouskem. Sokolnice – Busamberg 2x 220kV, 1 x 400kV Slavětice – Dünhor pro vzájemnou výměnu elektrické energie. Jsou vystavěny linky VVN 220kV. [2]

V osmdesátých letech minulého století jsou dokončeny a uvedeny do provozu jaderné elektrárny Dukovany a Jaslovské Bohunice. Započala výstavba třetí jaderné elektrárny v Temelíně. Politika levné elektřiny nadále přinášela problémy a vedla k prohlubující se neefektivitě průmyslu a k plýtvání s elektřinou. Jsou dostavěny páteřní linky ZVN 400kV. [2]



Obr.3. Propojené ES v Evropě.[7]

Po roce 1990 prodělala česká elektroenergetika zásadní změny. Uhelné elektrárny byly kompletně odsířeny. V roce 1992 byla založena soustava CENTREL, která sdružovala ES států tzv. Visegrádské aliance, jejímž úkolem bylo co nejrychlejší připojení k soustavě UCPTÉ (Union for the Coordination of Production and Transmission of Electricity). Zaniká státní podnik České energetické závody a vyčleněním vznikají jednotlivé podniky teplárenské, opravárenské, montážní a jiné, zároveň též i osm distribučních společností. [2]

V roce 1995 je zahájen zkušební provoz PS ČR s UCPTÉ, a za dva roky je dovršen trvalým připojením. Od roku 1999 je ČR (prostřednictvím ČEPS, a.s.) vedena jako řádný člen UCPTÉ a od roku 2001 i jako řádný člen UCTÉ (Union for the Coordination of Transmission of Electricity). V roce 2008 byla založena asociace 41 států Evropy, ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity), jejímž posláním je zajistit bezpečnost provozu propojených elektrizačních soustav, bezpečnou integraci obnovitelných zdrojů a zajištění fungujícího vnitřního trhu s elektřinou (IEM) uplatňovaného v Evropě. [2,3]

1.2 Elektrizační soustava ČR

Elektrizační soustava (dále také ES) je tvořena zařízeními pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektřiny, včetně elektrických přípojek a přímých vedení, a systémy měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky.

1.2.1 Výroba elektrické energie

Výrobu elektrické energie v ČR zajišťují různé druhy elektráren a tepláren, které jsou nedílnou součástí elektrizační soustavy ČR.

Tab.1. Výroba a instalovaný výkon různých druhů elektráren v ČR [1,6]

Typ zdroje	Instalovaný výkon (MW)				Výroba (GWh)		
	k 30. 9. 2014	2013	2012	2011	2013	2012	2011
Uhelné el.	10880,3	10819,5	10644,1	10787,5	44737,0	47261,0	49973,0
Jaderné el.	4290,0	4290,0	4040,0	3970,0	30745,3	30324,2	28282,6
Vodní el.	2258,3	2229,2	2215,7	2201,1	3761,7	2963,0	2835,0
Paroplynové el.	1279,6	1338,1	1270,9	1101,5	5272,4	4435,1	3955,1
Fotovoltaické el.	2060,9	2132,4	2086,0	1971,0	2070,2	2173,1	2118,0
Větrné el.	268,0	270,0	263,0	218,9	478,3	417,3	396,8
Celkem	21037,1	20736,61	20519,5	20250,0	87064,9	87573,7	87560,6

Ve světě se používají i jiné zdroje elektrické energie např. geotermální, solární s parní turbínou, přílivové a jiné. V ČR, ale nemají velké uplatnění, neboť vyžadují jisté přírodní „prvky“ např. sopečnou činnost, moře anebo polohopisné umístění.

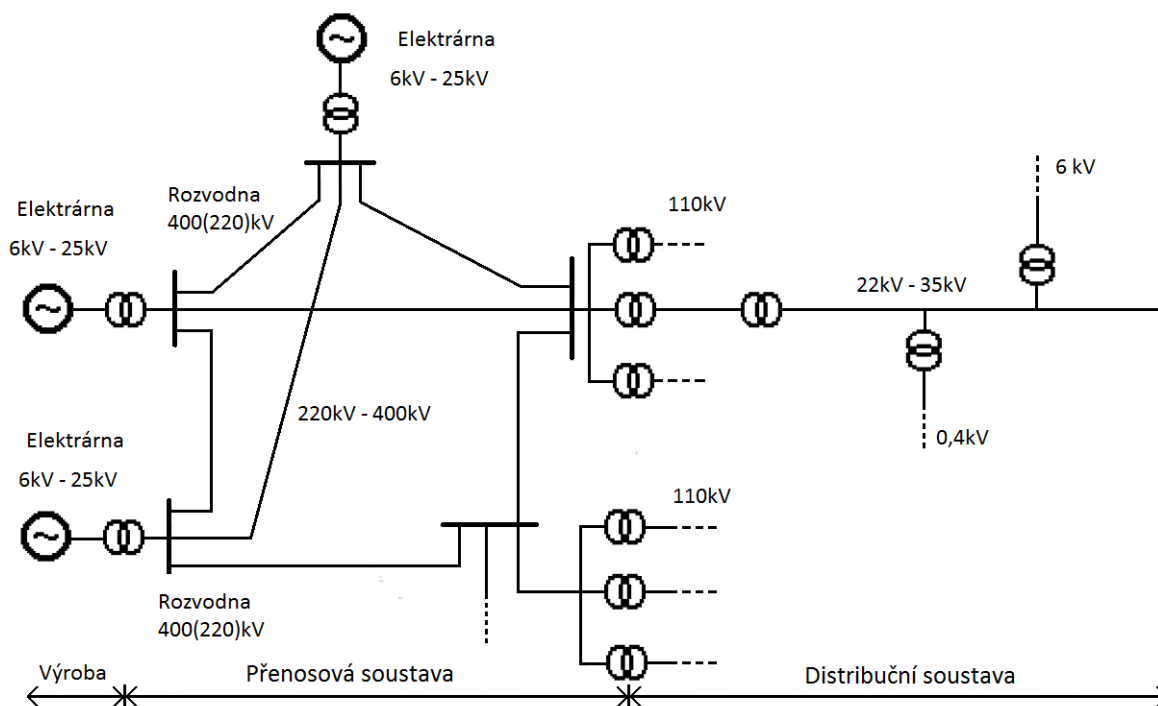
1.2.2 Přenosová soustava

Přenosovou soustavu (PS) tvoří transformovny, kompenzační stanice a vedení na napěťových úrovních ZVN 400kV, VVN 220kV a vybraná vedení VVN 110kV (vyvedení výkonu z elektrárny EMĚ2), na území ČR. Je propojena s okolními přenosovými soustavami sousedících států (50HertzTransmission, TenneT, PSE Operator, SEPS a Austrian Power Grid) pomocí přeshraničních vedení. Je také propojena s výrobkami elektřiny a s distribučními soustavami na území ČR. Přenosovou soustavu v České republice spravuje firma ČEPS, a.s. Viz obrázek č. 3 a 4 a příloha č. 1. Přenosová soustava je významově nadřazena distribuční soustavě.

Součástí PS je i poskytování systémových služeb, které slouží k zajištění bezpečného a spolehlivého provozu PS.

- Udržování kvality elektřiny
- Udržování výkonové rovnováhy v čase
- Dispečerské řízení
- Obnovení provozu
- Primární regulace
- Sekundární regulace
- Terciální regulace

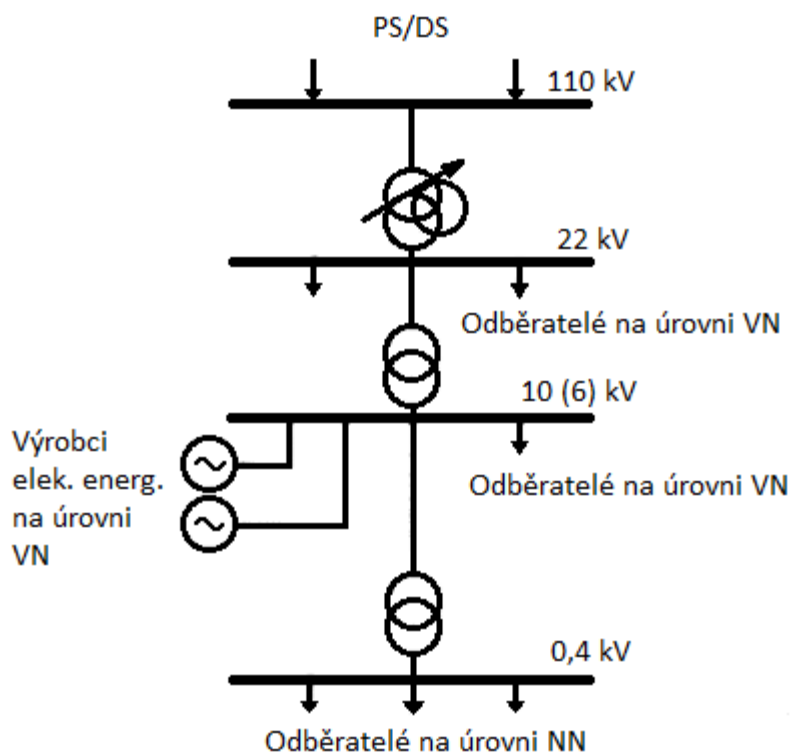
K tomuto účelu využívá zdrojů, které poskytují primární a sekundární regulaci frekvence (f), činného výkonu (P), napětí (U) a jalového výkonu (Q). Terciální zálohy, Vltavskou kaskádu – VSR, teplou a studenou zálohu a případně i nákup elektřiny v zahraničí.



Obr.4. Výřez schématu elektrizační soustavy

1.2.3 Distribuční soustava

Distribuční soustava navazuje na přenosovou soustavu ve směru ke spotřebitelům elektrické energie. Je provozována na napěťových úrovních VVN 110kV s výjimkou vybraných vedení, která jsou součástí přenosové soustavy, VN 35kV, 22kV, 10kV, 6kV, a dále na napěťové úrovni NN 400V a 230V. Tvoří ji rozvodny a transformovny, vedení na různých napěťových úrovních, a přípojky k jednotlivým spotřebitelům. Obrázek č. 5



Obr.5. Přehledové schéma distribuční soustavy

2. Prostředky pro regulaci toků výkonů v síti

V současnosti existuje vícero možností jak regulovat – směřovat elektrickou energii po vedení. V tabulce č. 3 je přehled základních prvků pro regulaci el. energie.

Tab.2. Srovnání dostupných prostředků pro regulaci P v síti [22]

Typ prostředku pro regulaci toků činných výkonů v síti	Regulace toků P	Rozsah regulace P	Regulace U/Q	Rozsah reg. U/Q	Rychlost regulace	Plynulost regulace	Cena zařízení
HVDC - přenos stejnosměrným proudem	Ano	požadovaný	Ne	-	vysoká	plynulá	značně vysoká
TCSC - tyristorově řízená sériová kompenzace	Ano	dostatečný	Ne	-	vysoká	plynulá	vysoká
UPFC - Univerzální regulátor toků výkonů	Ano	značný	Ano	značný	vysoká	plynulá	extrémní
TPR - Transformátoru s příčnou regulací	částečně	omezený	Ano	dle zadání	nižší (minuty)	stupňovitá (odbočky)	dosažitelná
PST - Transformátor pro regulaci fáze	Ano	značný	částečně	spíše malý	nižší (minuty)	stupňovitá (odbočky)	vysoká

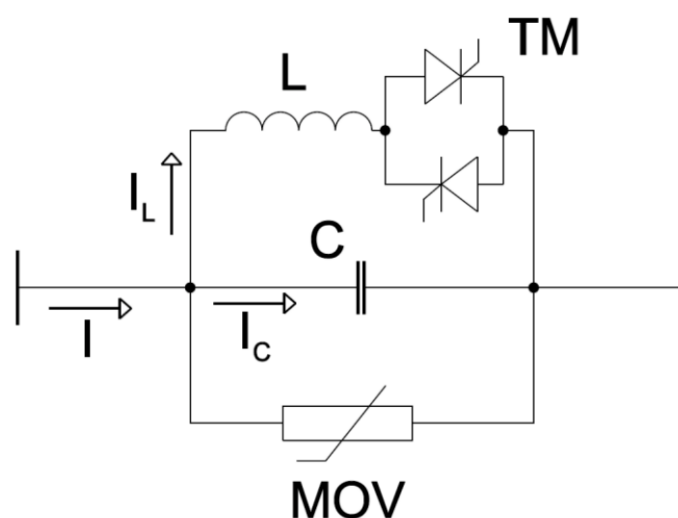
2.1 Přehled možností regulace toku elektrické energie

2.1.1 HVDC

Tento systém využívá toho, že u stejnosměrného proudu neexistuje fázový posuv, reaktance atd. Je plynule a rychle regulovatelný, v současnosti se ke stejnosměrnému přenosu proudu začínají energetici vracet, byť pořizovací náklady nejsou zanedbatelné. Příkladem jest propojka mezi Švédskem a Dánskem. Výhody se projevují při přenosu velkých výkonů a na velké vzdálenosti.[16,17,18]

2.1.2 TCSC

Tyristorově řízená sériová kompenzace umožňuje zvýšit přenosové schopnosti vedení a zlepšit dynamické a napěťové poměry v síti kde je připojena a řízena. [16,18]

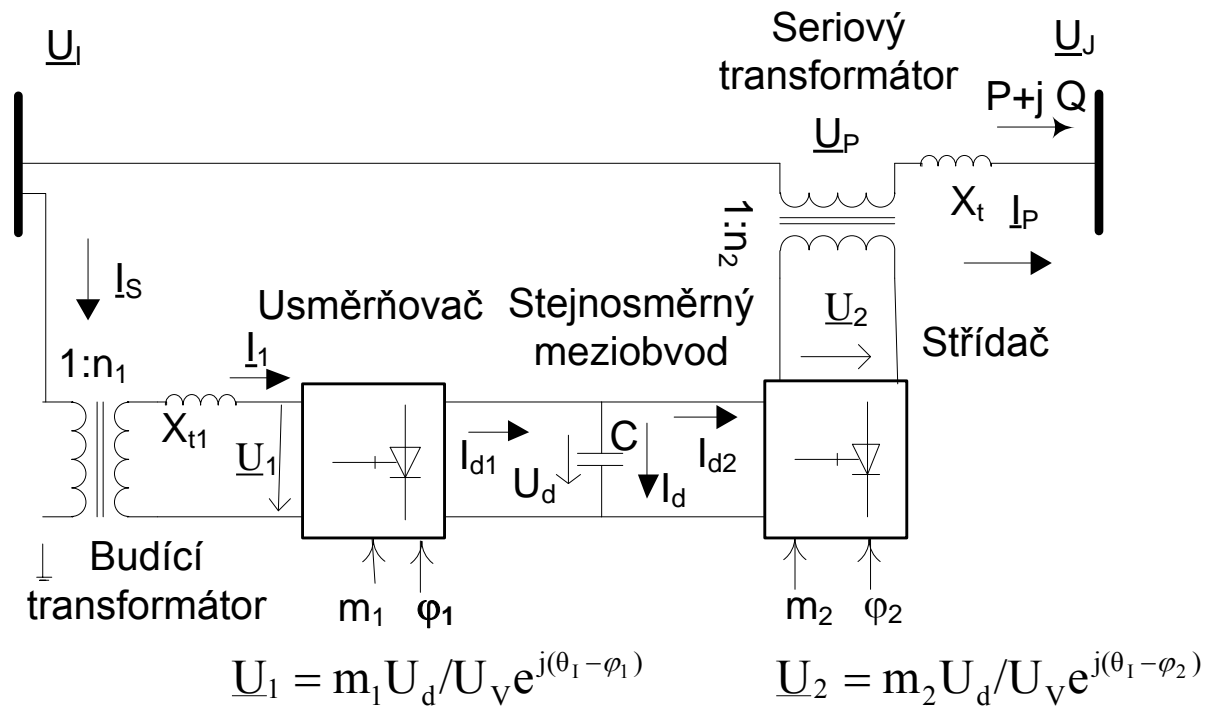


Obr.6. Schéma zařízení TCSC (*L*-tlumivka, *TM*-tyristorový můstek, *C*-kondenzátor, *MOV*-varistor) [18]

2.1.3 UPFC

Toto zařízení kombinuje schopnosti PST a frekvenčního měniče. Umožňuje nezávislé a plynulé řízení toku činného i jalového výkonu přes vedení, doplněné o možnost tlumení systémových kyvů. Je tedy nejpokročilejším zařízením, ale také nejdražším. [16,18]

UPFC sestává ze dvou transformátorů – budícího napájecího usměrňovače a sériového (booster) zapojeného v sérii s vedením a napájeného ze střídače dle obrázku č. 7. Mezi řízeným usměrňovačem a střídačem je stejnosměrný meziobvod s kondenzátorem. Zařízení je díky tomu schopno dynamicky, rychle a nezávisle řídit toky činného a jalového výkonu v síti a zároveň může i regulovat napětí v uzlu (stanici) kde je nainstalováno. [16,18]



Obr.7. Principiální schéma UPFC [18]

Usměrňovač i střídač je vybaven moderními tyristory GTO, takže lze pomocí pulzně šířkové modulace PWM měnit plynule amplitudu i fázi jednotlivých napětí změnou řídicích proměnných m a φ .

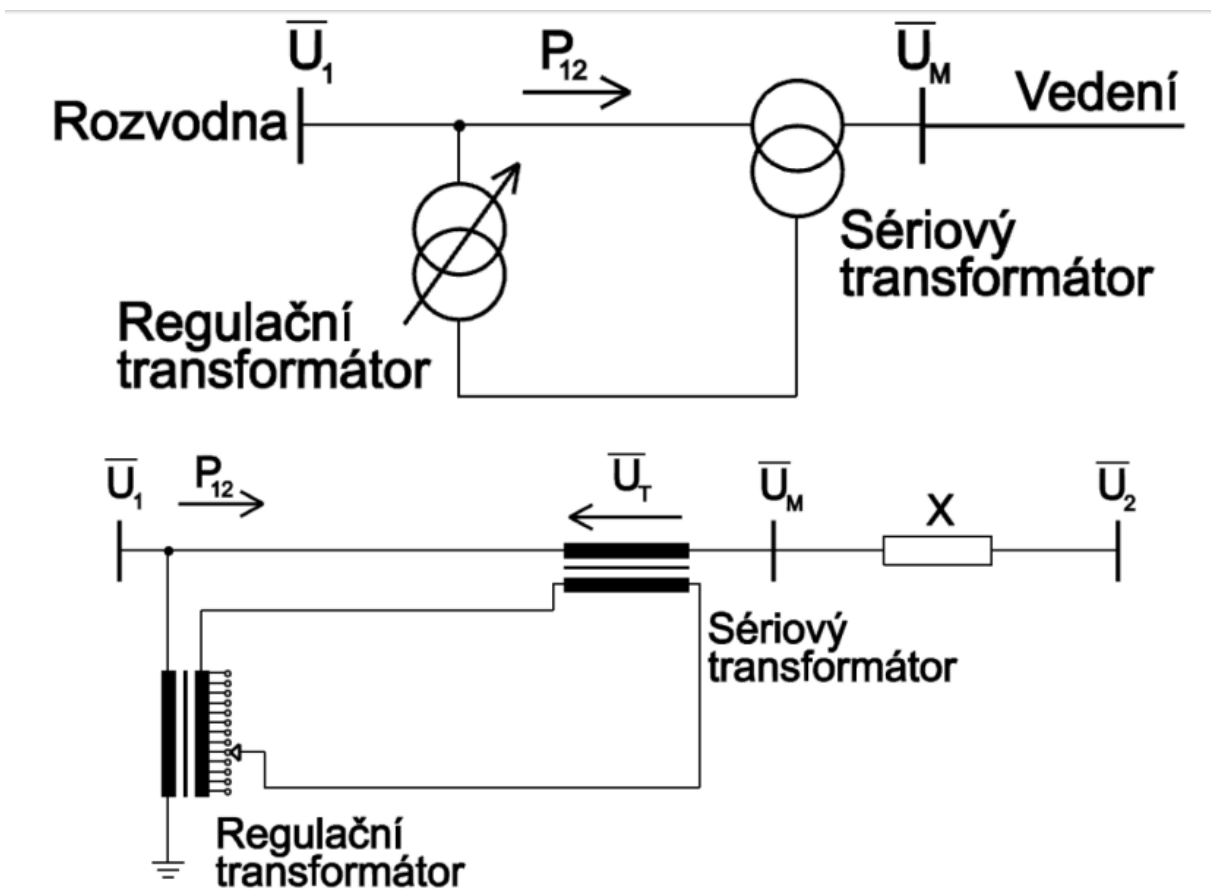
2.1.4 TPR a PST

Doposud jsme předpokládali, že převod transformátoru je reálné číslo, neboli transformátor mění jen amplitudy napětí (pokud nebereme v úvahu změny hodinové úhly při různých kombinacích zapojení hvězda – trojúhelník – lomená hvězda). Existují však transformátory, které mění záměrně nejen amplitudu, ale i fázi napětí za účelem regulace toku činného a jalového výkonu. Jedná se o transformátory s regulací fáze (PST) či transformátorů s příčnou regulací (TPR). Transformátory se od sebe liší tím, že PST je určen speciálně pro regulaci toku činného výkonu a jeho vstup i výstup je na stejné napět'ové hladině. Regulace úhlu u PST dosahuje většího rozsahu než u TPR, řádově desítky stupňů, zatímco transformátor s příčnou regulací dosahuje pouze několika jednotek stupňů. TPR spojuje dvě rozdílné napět'ové hladiny (400 a 220kV) a regulace fáze je spíše brána jako doplňková funkce. Zařízení se instaluje v rozvodně do vývodů vedení, jehož činný výkon se má regulovat. [16,17,22]

V současnosti se žádné transformátory pro regulaci fáze v přenosové soustavě ČR nepoužívají, ale jsou instalovány v soustavách okolních zemí, případně se uvažuje o jejich instalaci, jak ukazuje následující tabulka č. 3 a příloha č. 2.

Tab.3. Přehled PST ve středoevropském regionu [3]

Stát	Rozvodna	napětí	výkon	úhel	počet	Typ	úhel
		kV	MVA	α	odboček	Regulace	Θ
Rakousko	Ernsthofen	220	600	$\pm 35^\circ$	± 28	asymetrická	90°
	Ternitz	220	600	$\pm 35^\circ$	± 28	asymetrická	90°
	Tauern	220	600	$\pm 35^\circ$	± 28	asymetrická	90°
	Wien Südost	400/220	2x600	$\pm 8^\circ$	± 13	asymetrická	60°
	Dürnrohr	400/220	2x600	$\pm 8^\circ$	± 13	asymetrická	60°
Polsko	Mikulowa	400/220	2x500	$\pm 20^\circ$	± 11	symetrická	
	Joachimów	400/220	330	$\pm 14^\circ$	± 8	symetrická	
Slovinsko	Divača	400	2x600	$\pm 40^\circ$	± 32		



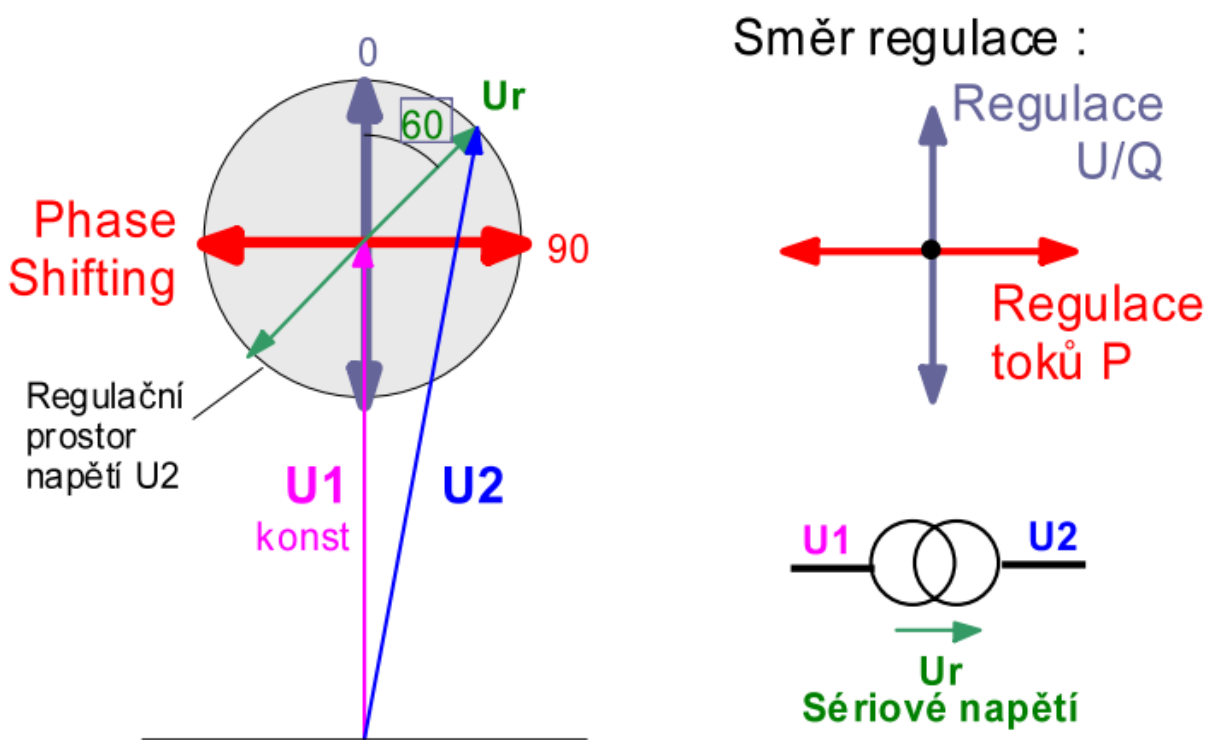
Obr.8. Principiální schéma PST – jednopólové [14]

2.1.5 Transformátor s regulací fáze

Existuje řada konstrukčních uspořádání PST. V přílohách 3-6 jsou uvedeny nákresy a fotografie různých typů PST ve světě. Pro vysvětlení principu použijeme uspořádání dle obrázku č. 8

Transformátor s regulací fáze (anglicky Phase Shifting Transformer) se skládá ze dvou jednotek-transformátorů, příčné (regulační) a sériové. Z regulační jednotky je získáváno napětí s fázovým posunem, které je vedeno do sériové jednotky, která je zapojena v sérii s přenosovým vedením. Na vinutí sériové jednotky vzniká fázový posun sečtením fázorů regulačního napětí a fázoru napětí regulovaného (napětí sítě). Tímto je dosaženo pootočení (posuvu) výsledného fázoru napětí. [14,18,22] Obrázek č. 9 a 10

Je-li regulační napětí ve fázi s fázovým napětím sítě, nastane změna amplitudy napětí, čímž lze řídit tok jalového výkonu a napětí. Pro požadované řízení toku činného výkonu je zapotřebí mítí rozdílné fáze napětí regulačního a síťového. Pokud je přikládáno „vstřikované“ regulační napětí kolmé na fázové napětí, dojde také ke změně amplitudy napětí. [14,22,23]

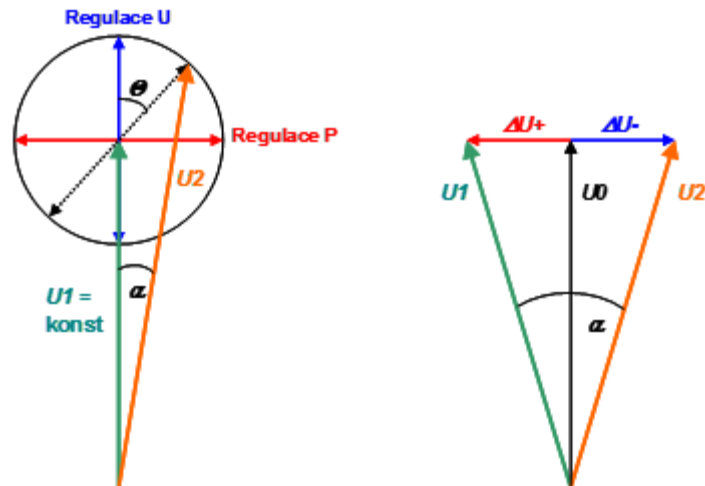


Obr.9. Fázové znázornění regulace úhlu [20]

$$P = \frac{U_1 * U_2}{X_V * X_{PST}} * \sin(\delta + \beta) \quad (W, V, V, \Omega, ^\circ) \quad (1)$$

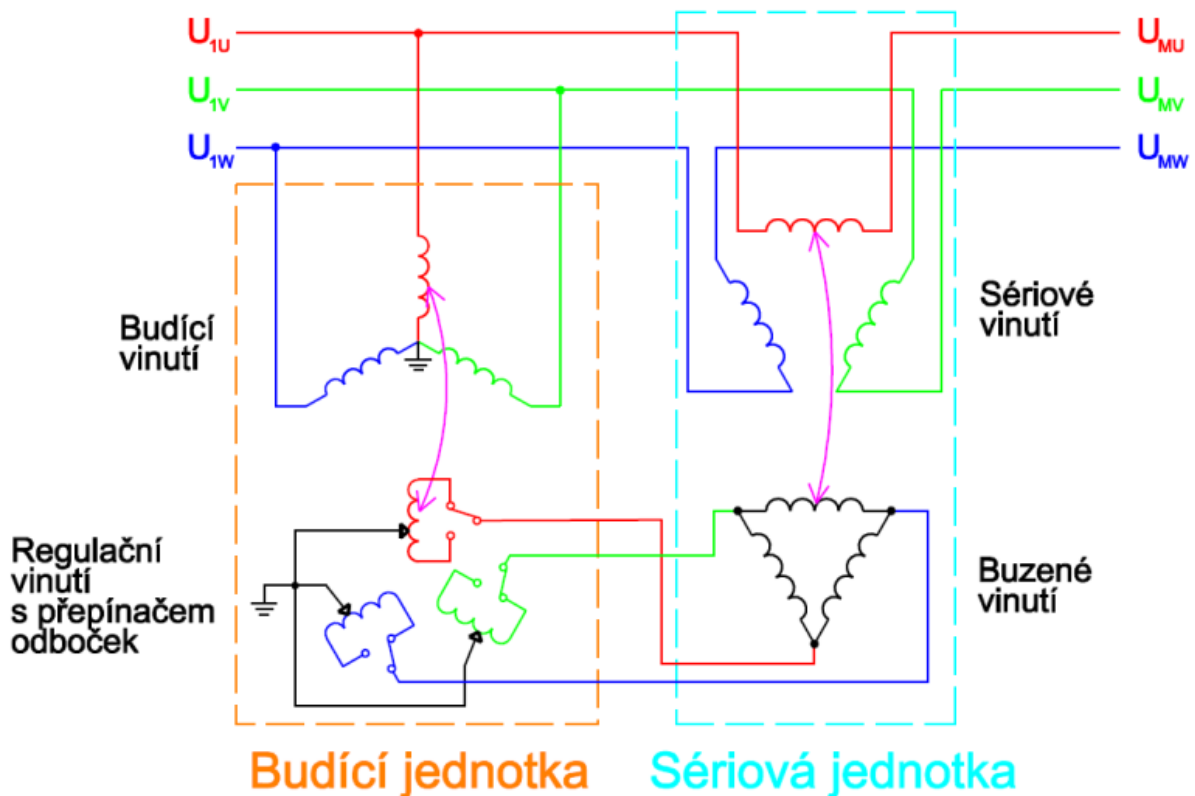
$$Q = \frac{U_1 * U_2}{X_V * X_{PST}} * \cos[(\delta + \beta) - 1] \quad (VAr, V, V, \Omega, ^\circ) \quad (2)$$

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 \quad (3)$$



Obr.10. Fázové znázornění regulace úhlu [22]

Sekundární strana regulačního transformátoru má více vývodů vyvedených na přepínač odboček s výchozí pozicí uprostřed. Přepínáním odboček na sekundárním vinutí regulačního transformátoru lze docílit regulace úhlu napětí jak do kladných tak i do záporných hodnot. (Obrázek č. 11) PST transformátory se vyrábějí dle požadavků zákazníka a tudíž má každý jiné parametry. V zásadě ale lze u těchto transformátorů najít stejné parametry jako u klasických transformátorů. [18,20,22,23]



Obr.11. Schéma vnitřního zapojení PST [18]

3. Důvody přetěžování přenosových soustav

Přenosová soustava České republiky je propojena se sítěmi soustav Evropské sítě provozovatelů přenosových soustav (ENTSO-E). PS ČR je obklopena pěti sousedními soustavami (50Hertz, TenneT, PSE, SEPS a APG). Přeshraniční propojení je využíváno pro mezinárodní obchod a přeshraniční přenos elektřiny mezi těmito soustavami. Provozovatelé přenosových soustav koordinovaně vypočítávají a přidělují přeshraniční přenosové kapacity pro mezinárodní obchod s elektřinou a jsou odpovědní v rozsahu v souladu s legislativou EU.

Přenosová soustava se může dostat do stavu, kdy jsou přenosové cesty přetíženy, to znamená, že jimi protéká větší proud, než na jaký jsou při daném napětí dimenzovány. Důvody přetížení bývají různorodé a také různě časté. Přetížení PS může nastat z důvodu: výpadku vedení VVN, elektrárny, nebo rozvodny (nedodržení kritéria N-1) a následné přetížení zbývajících částí PS, což se může stát díky lidské chybě (chyba obsluhy, špatné nastavení ochrany, padlý strom na vedení), přírodními silami (úder blesku, záplavy, bouře atp.), závady na přístrojích ovládajících PS, požáry, přetoky elektrické energie mezi soustavami, ale také nedostatečnou energetickou soběstačností dané země. [15]

V tabulce č. 4 je vybrán vzorek událostí ve světě s uvedením příčiny vzniku poruchy typu „Blackout“.

Tab.4. Blackouty ve světě [13]

Datum	Trvání	Zasaženo odběratelů [mil]	Zasažená oblast	Prvotní příčina
9. 11. 1965	14 hodin	30	severovýchod USA a část Kanady	Chyba v nastavení ochrany, údajně 1. velký blackout v historii [1]
13. 7. 1977	25 hodin	9	Město New York	Kombinace poruch a chyb [2]
20. 2. 1998	5 týdnů	0,06	Auckland (Nový Zéland)	Závada na zastaralém VN kabelu [3]
14. 8. 2003	60 hodin	50	severovýchod USA a část Kanady	Výpadek zdroje v době vysoké poptávky a následně kontakt přetíženého vedení VVN s přerostlými stromy [4]
28. 8. 2003	1 hodina	0,5	Londýn	Dva výpadky v rychlém sledu [5]
23. 9. 2003	2 hodiny	5	Dánsko a jih Švédska	Závada odpojovače krátce po výpadku jaderné elektrárny [6]
28. 9. 2003	12 hodin	56	Itálie, část Švýcarska	Bouře zničila vedení VVN [7]
12. 7. 2004	12 hodin	5	jižní Řecko	Přetížení přenosové soustavy, výpadek dvou elektráren [8]
9. 1. 2005	5 týdnů	0,7	jih Švédska	bouře Gudrun [9]
24. 5. 2005	1 den	2	Moskva, Rusko	požár v rozvodně [10]
18. 8. 2005	7 hodin	100	Bali, Jáva a Indonésie	Výpadek vedení VVN [11]
4. 11. 2006	20 minut	15	UCTE	Manuální odpojení vedení VVN bez ověření kritéria N-1, UCTE se rozpadla na tři ostrovy [12]
27. 4. 2007	4,5 hodiny	25	Kolumbie	Chyba obsluhy v rozvodně [13]
28. 1. 2008	12 dní	cca 30	Čína	Sněhová bouře zničila vedení VVN [14]
8. 9. 2011	12 hodin	3	USA a Mexiko	Výpadek vedení VVN po chybě obsluhy [15]
30. 7. 2012	16 hodin	300	Indie	přetížení vedení VVN [16]
31. 7. 2012	8 hodin	670	Indie	závada relé [17] největší světový výpadek proudu
26. 10. 2012	4 hodiny	53	severovýchod Brazílie	požár v rozvodně [18]
15. 11. 2012	1 hodina	0,45	Mnichov, Německo	závada v rozvodně nebo v elektrárně [19]

3.1 Výpadky

Potíže v přenosové soustavě bývají jednou z příčin rozsáhlých výpadků dodávky elektrické energie. Zařízení přenosové soustavy jsou vybavena pojistnými prvky, které zajistí odpojení vybraných odběratelů v případě, že by hrozilo zničení nebo rozpad sítě vlivem jejího přetížení. Pokud by se tak nestalo, je zde reálná možnost kaskádového šíření poruchy – po selhání přetíženého vedení vzroste přetížení zbytku sítě, a jsou postupně odpojeny další a další prvky sítě, případně až po zcela nežádoucí kompletní rozpad celé přenosové soustavy. Z ekonomických důvodů je vhodné, pokud to je možné, odpojovat nejprve ty odběratele, kde výpadek napájení způsobí nejmenší hospodářské škody. Výpadky se staly běžnou definicí momentu, kdy dodávka elektřiny a poptávka nejsou v rovnováze a selže zajištění dodávek.

3.2 Množství a příčiny výpadků v EU

Při porovnání trvání a počtu výpadků v různých státech EU se počet neplánovaných přerušení u mnoha zemí zdá být celkem malý, např. Velká Británie a Nizozemsko mají méně než jedno přerušení na zákazníka (daného státu) ročně. Zato u některých zemí jsou hodnoty naopak větší, zvláště u jihoevropských zemí. Celkově vzato počty i trvání přerušení vykazují značně klesající trend. [11,15]

Podle statistik, energetických společností, jsou výpadky ve velké míře zapříčiněny přírodními příčinami, jako bouře obzvláště blesky, vítr a následkem i padání větví a stromů do linek. Technické chyby (např. stárnutí izolace, opotřebení materiálu) jsou také časté, ale to i výpadky, u nichž pozadí příčiny zůstává neznámé. Na stránkách energetických společností je i rozebráno jakou úlohu sehrává období a s jakou četností se vyskytují poruchy výpadků a z jakých příčin. [3,15,19]

3.3 Blackout – průběhy a dopady

Blackout je ve své podstatě totéž co výpadek. Je definován jako masivní výpadek elektřiny pro velké množství koncových uživatelů, s přesahem do sociální, zdravotní, výrobní a hlavně ekonomické oblasti života lidstva. Časově je neomezen.

3.3.1 Případy Blackoutů v Evropě

Rozsáhlé výpadky v Evropě jsou shrnuty v tabulce 5. I když tyto události lze definovat jako „výjimečné“ poruchy, zdají se být celkem časté. Nejkritičtější se z tohoto úhlu pohledu zdá rok 2003, kdy se v Evropě vyskytly dva velké výpadky, a další dva v severní Americe.

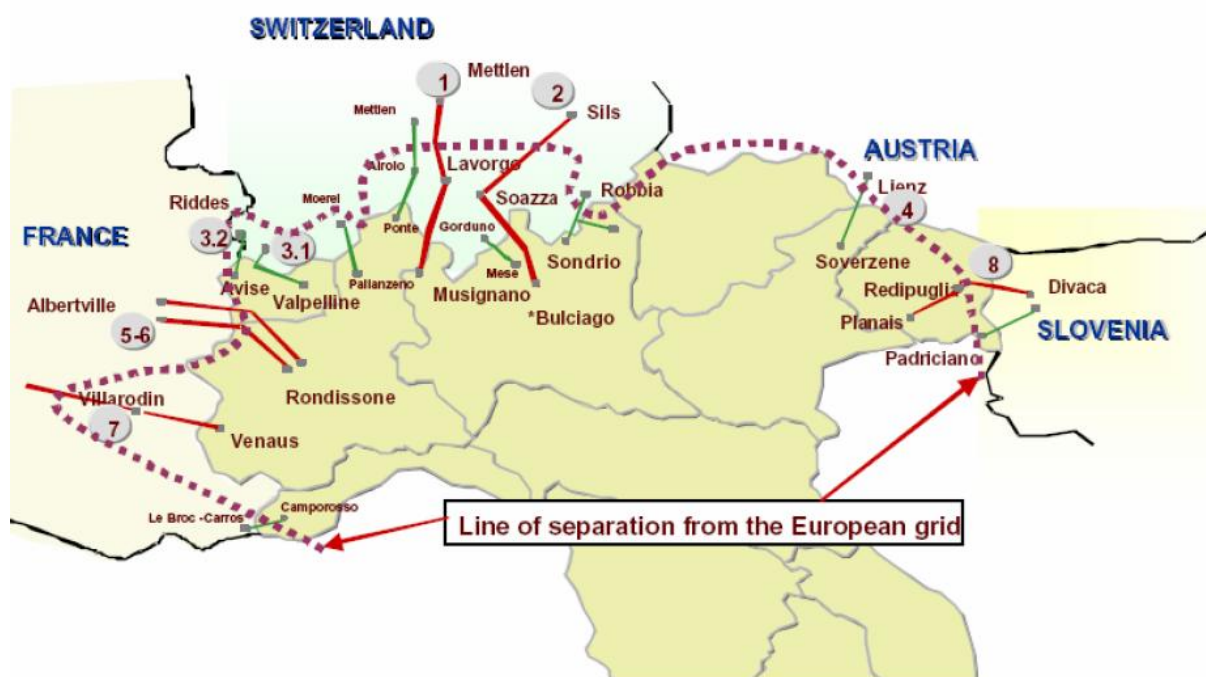
Existuje jasný rozdíl mezi výpadky, které způsobila příroda a těmi, které byly zapříčiněny jinými chybami. V tabulce zůstávají poruchy způsobené přírodou (Švédsko 2005 a Francie 1999) uvnitř jedné země. Jejich trvání se však může protáhnout na několik týdnů a tak jsou náklady na přerušení vysoké. Dlouhé trvání je nejpravděpodobněji způsobeno rozsáhlým poškozením silnými bouřemi a také nebezpečnými podmínkami oprav během událostí. Výpadky nezpůsobené přírodou jsou naopak daleko kratší, ale týkají se většího počtu koncových uživatelů, příležitostně přechází i z jedné země do druhé. [15]

Tab.5. Případy výpadků v Evropě [15]

Postižená země, rok	Typ události	Následky v energetickém systému	Společenské následky		
			Počet přerušených koncových uživatelů/ materiální škody	Stanovené trvání, nedodaná energie	Odhadované náklady na celou společnost
Švédsko/Dánsko, 2003	Zkrat odpojovače následovaný dvojitým zkratem sběrnice	Ztráta všech linek a izolování výroby jižního Švédska/Dánska, kolaps napětí	0,86 milionů ve Švédsku a 2,4 milionů v Dánsku	2,1 hodiny, 18 GWh	145 - 180 milionů €
Francie, 1999	Dvě po sobě jdoucí bouře, extrémní vítr	Rozsáhlé výpadky, 0,4% celkové délky sítě poškozeno	1,4-3,5 milionů, 193 milionů m ³ dřeva zničeno	2 dny - 2 týdny, 400 GWh	11,5 miliard €
Itálie/Švýcarsko, 2003	Přetížení vedení mezi Švýcarskem a Itálií	Kolaps celého italského systému elektrické energie	55 milionů	18 hodin, ?	?
Švédsko, 2005	Bouře Gudrun, extrémní vítr	Rozsáhlé poškození vzdušného vedení v jižním Švédsku	0,7 milionů, 70 milionů m ³ dřeva zničeno	1 den - 5 týdnů, 111 GWh	400 milionů €
Střední Evropa, 2006	Chyba sběrnice v transformovně v Německu	Poruchy v celé propojené rozvodné síti Evropy	15 milionů domácností	Méně než 2 hodiny, ?	?

3.3.2 Výpadek z roku 2003 Itálie a Švýcarsko

V neděli 28. září 2003 postihlo italský energetický systém nejhorší narušení od druhé světové války. Výpadek postihl celý stát a také části přilehlé části Švýcarska. Ve Švýcarsku byla dodávka elektřiny obnovena za zhruba 1,5 hodiny, ale v Itálii byly služby zcela obnoveny u všech zákazníků až za 18 hodin. Událost započala ve 3 hodiny ráno selháním vedení VVN 380kV Mettlen-Lavorgo. Zatížení na vedení bylo před selháním relativně vysoké, kolem 86% maximální kapacity vedení. Zároveň též nebyla prováděna důkladná údržba prostoru vedení, což mělo za následek vysoký vzrůst náletových dřevin v okolí vedení. Vysoká zátěž byla dlouhodobá a měla za následek přehřátí vodičů, jejich prověšení a následný přeskok výboje na zmiňovaný strom. [10,15]



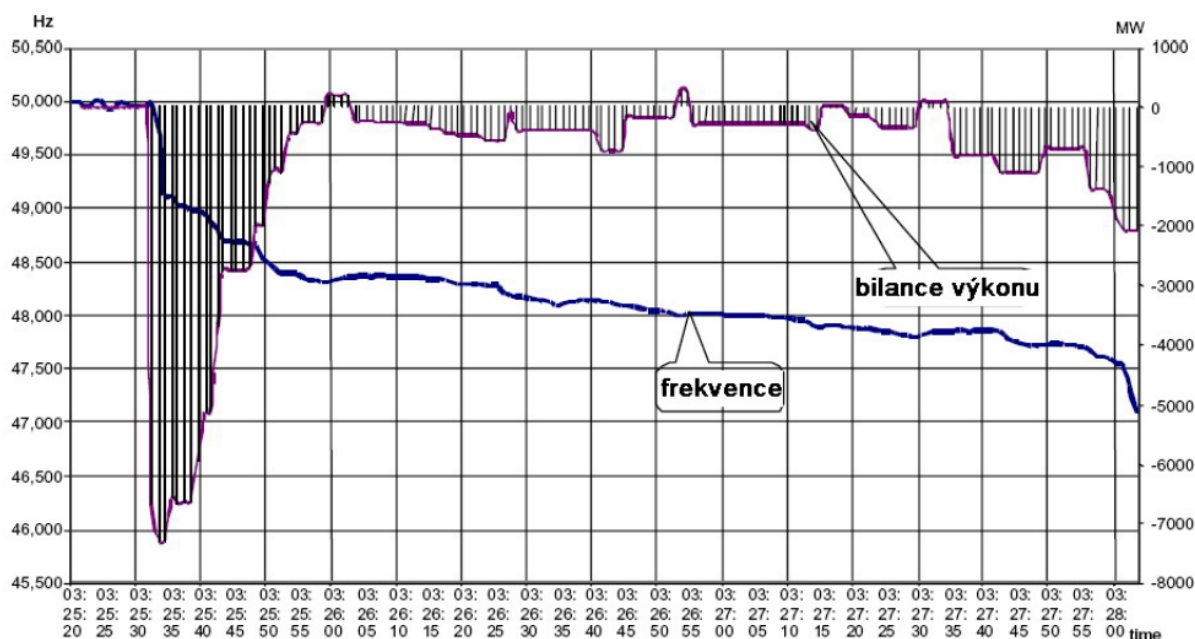
Obr.12. Průběh Blackout v Itálii roku 2003 [21]

ETRANS (švýcarský koordinátor přenosového systému vysokého napětí) se několikrát znovu pokusil vedení obnovit a to jak OZ, tak manuálně. Ve 3:11 ráno ETRANS telefonoval italskému provozovateli přenosového systému GRTN. ETRANS požádal GRTN, aby snížil

italský import o 300 MW, protože Itálie importovala asi o toto množství více oproti plánovanému saldu. Itálie snížila svůj import 10 minut po telefonátu. K uvolnění přetížení ve Švýcarsku to však nestačilo. [10,15]

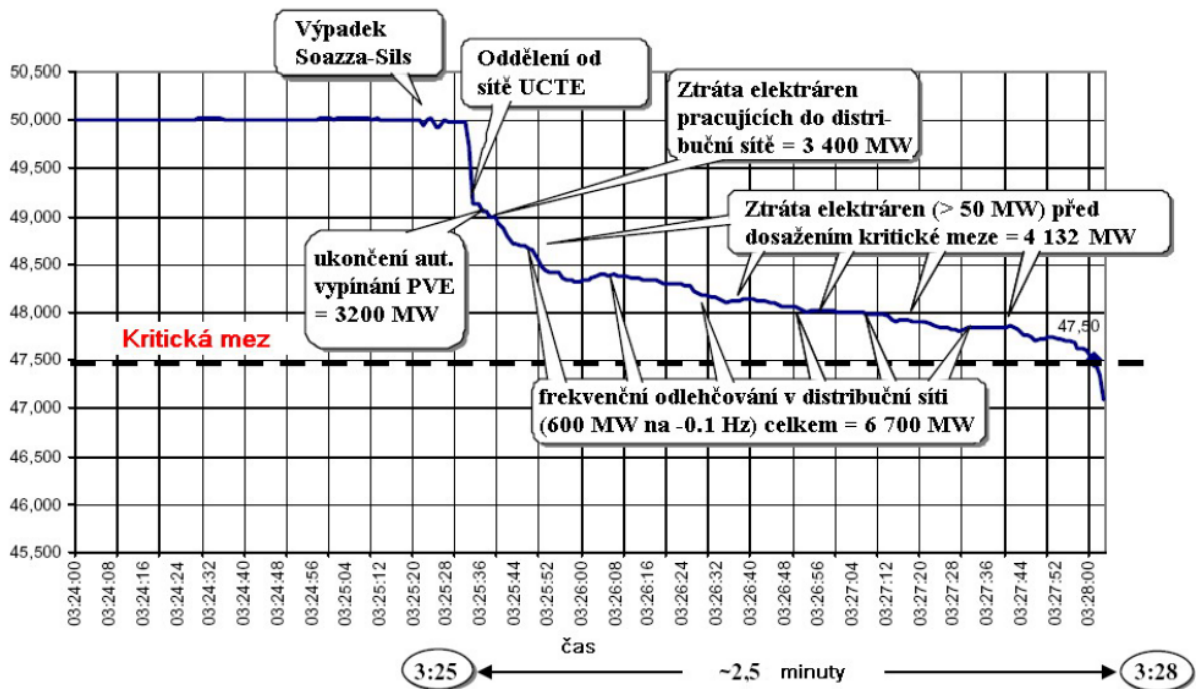
Po selhání vedení Mettlen-Lavorgo se zvýšila zátěž na ostatních mezistátních linkách. Zvláště švýcarské 380kV vedení Sils-Soazza fungovalo na 110% své normální maximální míry. Provozní normy UCTE uvádí, že přetížení tohoto rozsahu lze v nouzovém stavu udržet, nikoli však delší dobu. Podle provozních norem měl švýcarský provozovatel méně než 15 minut na snížení přetížení. Ale ve 03:24 hodin se linka Sils-Soazza vypnula, důvodem bylo opět přehřátí vodičů a výboj se stromem. Následně se přetížily další linky a vypnula se vedení mezi Švýcarskem a Itálií a mezi Švýcarskem a Francií. V tomto bodě přišel italský systém o synchronizaci se sítí UCTE a automatická ochranná zařízení odpojila všechna zbývající propojovací vedení z Itálie. Obrázek č. 12 [10,15,21]

Oddělení od sítě UCTE způsobilo frekvenční pokles z nedostatku výkonu v celé Itálii. GRTN mělo automatický plán v případě poklesu frekvence, který selhal, protože byl „stavěn“ na odlišnou situaci. Ale ani frekvenční odlehčování nedokázalo předejít rozpadu celého italského energetického systému. Obrázek č. 13 a 14 [15,21]



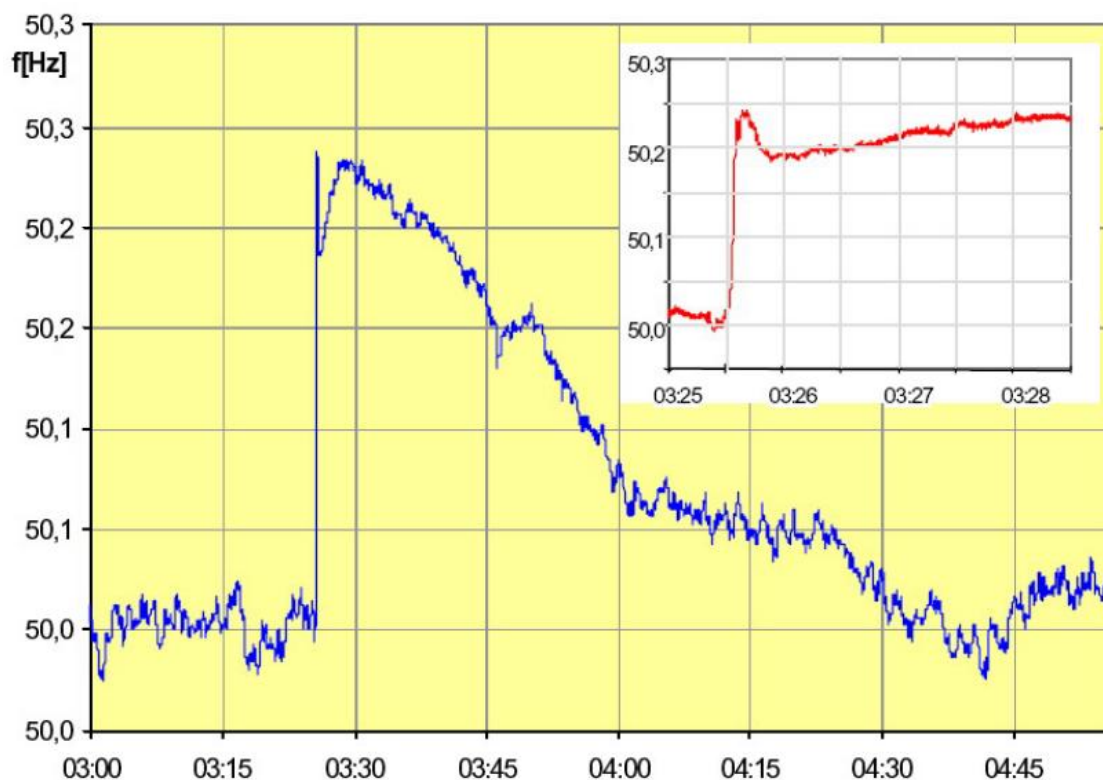
Obr.13. Průběh poklesu frekvence v italské PS [21]

Ztráta poptávky v Itálii také vyústila ve výrazný propad zátěže v celém systému UCTE, který vedl k ostrému vzrůstu frekvence napříč systémem UCTE. Existovalo potenciální nebezpečí, že selhání budou kaskádovitě postupovat Evropou, ale provozovatelé systému ve Francii, Německu a Belgii včas tomu předešli úspěšnou odezvou na nouzový stav. Obrázek č. 15 [15,21]



Obr.14. Průběh poklesu frekvence v italské PS [21]

Z dnešního pohledu je zřejmé, že problém vznikl z několika příčin. Prvotně bych zmínil energetickou nesoběstačnost Itálie v době výpadku, dále bych zmínil nedostatečnou údržbu přenosových cest. S tím také souvisí neschopnost švýcarského provozovatele PS opětovně nahodit přenosovou linku.



Obr.15. Průběh frekvence v sítích UCTE po odpojení Itálie [21]

3.3.3 Společenské dopady výpadků proudu

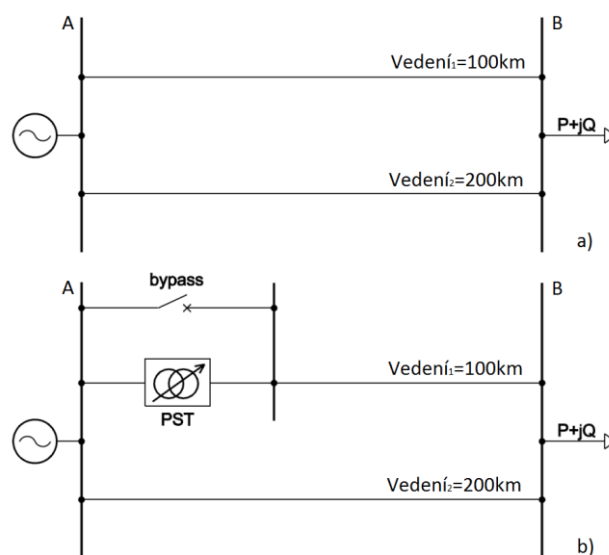
Všechny elektrické technologie, jako počítače, přístroje, osvětlení a elektrické vytápění jsou během přerušení dodávky samozřejmě nedostupné. Ale také i další formy infrastruktury. I krátká přerušení mohou způsobit vážné problémy s dopravou, likvidací odpadů, pitnou vodou, správou odpadních vod a komunikacemi ve městech. Přerušení delší než jeden den povedou k faktickému rozbití dopravy a zaplavení odpadními vodami spíše v níže položených aglomeracích. [15]

Dále je přerušena výroba ve výrobních závodech, kde vznikají prostoje, škody na majetku, případně i újmy na životech. Náklady na výpadky se poté neúměrně značně navyšují. Za další bych zmínil i sociální dopady jako je snížení životní úrovně, pohodlí. Lidé jsou v současnosti na elektrické energii závislí a svoji závislost ještě prohlubují.

4. Možnosti předcházení Blackoutu s PST

Blackout je důsledek celé řady příčin které mohou být spolu provázány, anebo působit jednotlivě. Transformátor PST je opatřením na jeden druh příčin vzniku poruchy Blackout. Na příčinu přetěžování vedení. Transformátor dokáže v závislosti na zvolené odbočce regulační části omezit přetok elektrické energie po té části vedení, ve které je zapojen. A to za cenu takovou, že „odkloněná“ energie protéká po jiných vedeních propojených soustav, které se můžou dostat do stavu přetížení. Proto použití PST v elektrizační soustavě musí být korigováno tak aby „odklánění přetoků“ neohrozilo jiné prvky a společníky v propojených soustavách.

Možností předcházení výpadkům elektrické energie je několik. Jejich použití je odvislé od finanční, časové a technické náročnosti. Výstavba nových posilujících mezistátních přenosových linek je finančně a časově náročnější, než instalace PST. Zařízení PST se instalují do míst, která jsou ohrožena přetížením, tím jsou nejčastěji mezistátní propojovací vedení, nebo účelově do míst, kde se potřebuje přerozdělit výkon do více přenosových cest. Obrázek č. 16

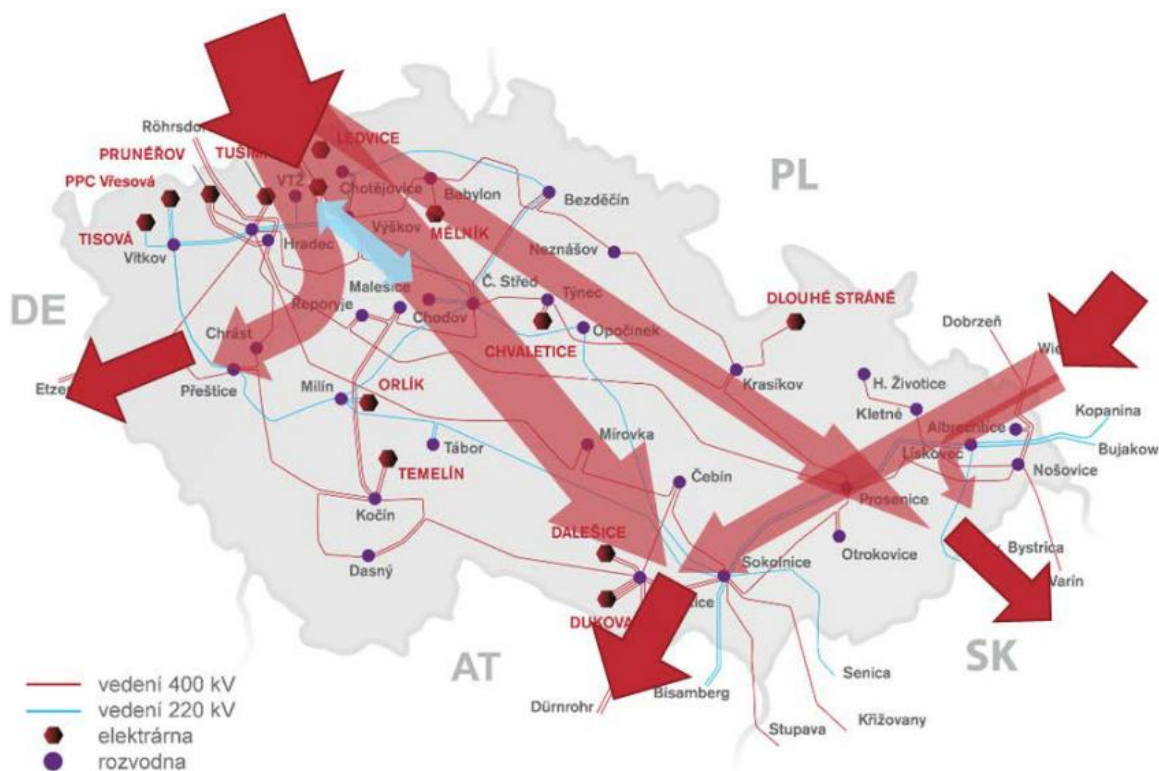


Obr.16. Zjednodušené schéma PS mezi body A-B: a) bez PST, b) s PST

V České republice dochází k přetěžování vedení nejčastěji, díky neplánovaným přetokům energie z Německé republiky. Obrázek č. 17. Z technického hlediska jsou neplánované přetoky přirozeným jevem, mohou však přerůst ve výrazné nebezpečí ohrožující bezpečnost celé přenosové sítě. Příčinou jest rychlý nárůst obnovitelných zdrojů energie především větrné v Německu, druhým je nedostatečnost přenosového vedení provozovatele PS v Německu, a proto dochází k využívání přenosové kapacity sousedních států. Problémy v přenosových sítích způsobené OZE se začaly objevovat přibližně od roku 2008 a stále jich přibývalo, docházelo k porušení bezpečnostního kritéria N-1 a v případě problému na vedení by mohlo dojít k Blackoutu. V současnosti lze očekávat, že riziko vzniku výjimečných stavů v přenosové síti s další instalací OZE zdrojů poroste, pokud s nimi zároveň nebudou budovány přenosové kapacity propojující nová místa výroby se starými místy spotřeby. Pokud se podaří upravit společný evropský energetický trh s elektřinou správným směrem a zrychlí se výstavba přenosových sítí mezi severem a jihem Německa, měla by být Česká PS schopna, odolávat problémům způsobených zapojováním OZE do sítě v Německu, lépe, než je tomu dnes.

5. Simulace PST proti přetěžování na modelu PS

V plánu rozvoje přenosové soustavy ČR je zmíněno umístění PST v rozvodně Hradec u Kadaně na dvojité mezistátní lince 400kV Röhrsdorf – Kadaň. [26]



Obr.17. Vliv zahraniční spolupráce – současné a do budoucna předpokládané přetoky elektrické energie. [26]

Z důvodu velké náročnosti při modelaci přenosové soustavy se nepodařilo provést simulaci přenosové soustavy s PST transformátorem. Po poradě s vedoucím diplomové práce jsem

se zaměřil na modelaci vedení 400kV v okolí Hradecké rozvodny kde budou transformátory nainstalovány. Příloha č. 7

5.1 Vedení

Při přenosu elektrické energie z bodu A do bodu B dochází k posunu fázového úhlu napětí vlivem reaktancí na dlouhém vedení. Jelikož z bodu A do bodu B, existuje více cest, vložením PST do vedení je možnost řídit velikost i směr výkonových toků v síti.

Mezi body A-B přenosové soustavy je nataženo více elektrických vedení s různým průřezem (S) a délkou (l). Tudíž jsou rozdílná i elektrickými parametry – rezistencí (R), indukčností (L), kapacitou (C) a svodem (G), tudíž i rozdílnou přenosovou schopností. Obrázek č. 16

Pro modelaci sítě je vhodné tyto parametry přepočítat na jednotku délky [km] vedení.

- Odpor R_K [$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$]
- Induktivní reaktance X_K [$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$]
- Kapacitní susceptance B_K [$\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$]
- Svod G_K [$\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$]
- Podélná impedance: $Z_K = R_K + jX_K$ [$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$]
- Příčná admitance: $Y_K = G_K + jB_K$ [$\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$]

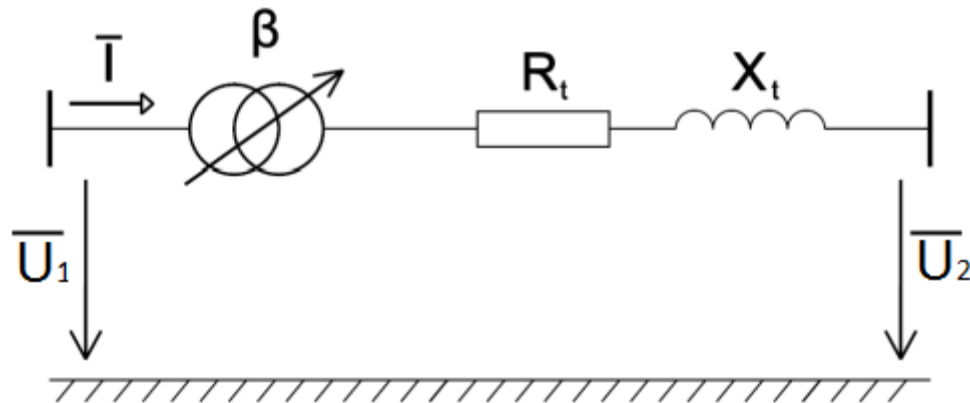
U simulace vedení ZVN 400kV lze zanedbat R_K a G_K pro jejich zanedbatelné hodnoty oproti X_K a B_K . Z tabulky č. 6 je toto patrné. Pro zjednodušení modelace se používají články, dvojbrany se soustředěnými parametry, neboť použití dvojbranů s rozprostřenými parametry je zdlouhavé a složité.

Tab.6. Parametry hodnot vedení 400kV (3svazek x 450AlFe, stožár typu Kočka) [18]

Délka vedení	Rezistence	Induktivní reaktance	Kapacitní susceptance
L [km]	R [Ω]	X_K [Ω]	B_K [μS]
1	0,022	0,307	3,809
100	2,2	30,7	380,9
200	4,4	61,4	761,8

5.2 Parametry PST

Transformátor PST lze s jistou nepřesností považovat za podélnou reaktanci, kdy příčná část PST je zdrojem regulačního úhlu β a sériová část PST je složena z odporu R_t a reaktance X_t vinutí zapojeného do série s vedením. Obrázek č. 18



Obr.18. Zjednodušené pojetí PST. [18]

Jeho nasazení do linky vedení, i při nastavené nulové odbočce, omezí přetoky činného výkonu z důvodu zvýšení podélné indukční reaktance X_t o podélnou reaktanci transformátoru X_{PST} . To je jeden z negativních vlivů transformátoru PST na soustavu.

Parametry PST transformátoru jsou obdobné s běžnými transformátory.

U_n – Napětí transformátoru PST

S_n – průchozí výkon PST

u_k – napětí nakrátko

ΔP_k – ztráty nakrátko

ΔP_k – ztráty naprázdno

i_0 – proud naprázdno

i_n – jmenovitý proud

Namodelované vedení s PST je v příloze č. 8

6. Závěr

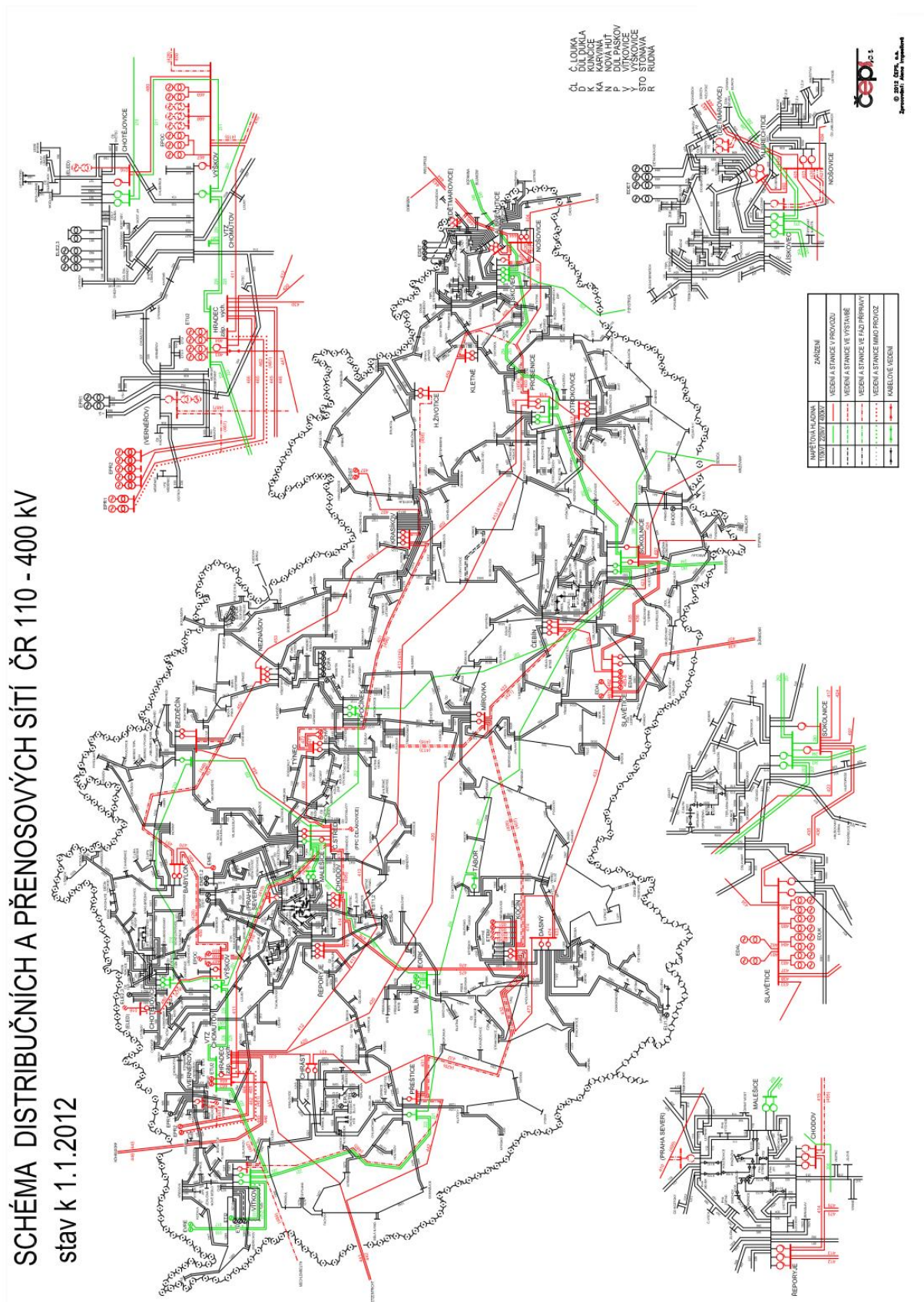
V této práci jsem se zabýval transformátory s regulací fáze, Blackoutem a možností předcházení poruchy výpadku sítě s pomocí PST. V první části jsem popsal vývoj elektrizační soustavy na území české republiky. Pochopením vývoje a historie elektrizační soustavy můžeme domýšlet budoucí kroky v ES. Stěžejní částí diplomové práce bylo objasnit princip fungování transformátoru s regulací fáze. Toto zařízení se převážně instaluje do vývodů přenosových mezistátních vedení, na kterých se poté regulují a řídí toky činných výkonů. PST transformátor dokáže měnit zátěžný úhel podle potřeb v místě instalace. Vhodným navolením odbočky dokáže přerozdělit toky činných výkonů z přetížených vedení na ostatní vedení, která mají volné přenosové rezervy, tak, aby byly přenosové cesty byly zatíženy efektivněji a rovnoměrněji. K tomu je zapotřebí užší mezinárodní spolupráce, neb by pak také mohlo dojít i k přetěžování ostatních linek v ES sousedního státu. V další kapitole byl proveden rozbor příčin poruch typu Blackout a na příkladu výpadku ES italského provozovatele, v roce 2003 kdy byl postižen celý Apeninský poloostrov, je shrnut průběh Blackoutu. V poslední části jsem se snažil namodelovat PS České republiky v programu Dynast. Modelace přenosové soustavy, složená z paralelních vedení různých délek, přes kterou je přenášen výkon do okolních soustav PS a také do distribuční soustavy až do místa odběru, byla nad moje síly a nebyl jsem schopen toho dosáhnout. Proto do domluvě s vedoucím DP jsem nemodeloval PS ČR.

7. Seznam literatury

- [1] Elektřina. Dostupné z: <http://energostat.cz/elektrina.htm>
- [2] KUBÍN, Miroslav. *Proměny české energetiky: historie, osobnosti, vědecko-technický rozvoj*. Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice, c2009, 615 s. ISBN 978-802-5445-242.
- [3] <https://www.ceps.cz/>.
- [4] TYDOR, Maximilián. Nikola Tesla - muž, který změnil naše životy. 8. 12. 2011. Dostupné z: <http://www.tvfreak.cz/nikola-tesla-muz-ktery-zmenil-nase-zivoty/4487-2>.
- [5] HEJTMÁNKOVÁ, Pavla. ES.doc. Dostupné z: <http://home.pilsfree.net/fantom/>
- [6] *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku*. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., 2013, roč. 68, 8-9. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/>, článek Struktura elektrizační soustavy ČR, autor Ing. BUBENÍK, Josef.
- [7] ŠROM, Jakub. *Řízení frekvence a výkonové bilance v elektrizační soustavě*. Praha, 2009. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/>. Odborný článek. ČVUT.
- [8] MAYER, Daniel. *Pohledy do minulosti elektrotechniky: objevy, myšlenky, vynálezy, osobnosti*. 2., dopl. vyd. České Budějovice: Kopp, 2004, 427 s. ISBN 80-723-2219-2.
- [9] *Kodex přenosové soustavy*. Praha: ČEPS, a.s., 2012. Revize 12. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/>.
- [10] DVORSKÝ, Emil. Řízení soustavy v krizových stavech-Blackout. In: s. 27. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dvorsky/>.
- [11] Blackout. [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://blackout.gmu.edu/>
- [12] MÁSLA, Karel. Řízení frekvence-bilance činných výkonů v ES: Přednáška k předmětu Řízení ES. s. 21. Dostupné z: <http://fe1.vsb.cz/>.
- [13] BECHNÍK, Bronislav. Blackout a obnovitelné zdroje energie. [online]. 2013 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/9517-blackout-a-obnovitelne-zdroje-energie>.
- [14] ČERMÁK, Jaroslav a Petr HAMOUZ. Rozvoj přenosové soustavy v ČR: Transformátory s příčnou regulací fáze. In: *KONFERENCE CIRED*. Tábor: ČK CIRED, 2013, s. 18.

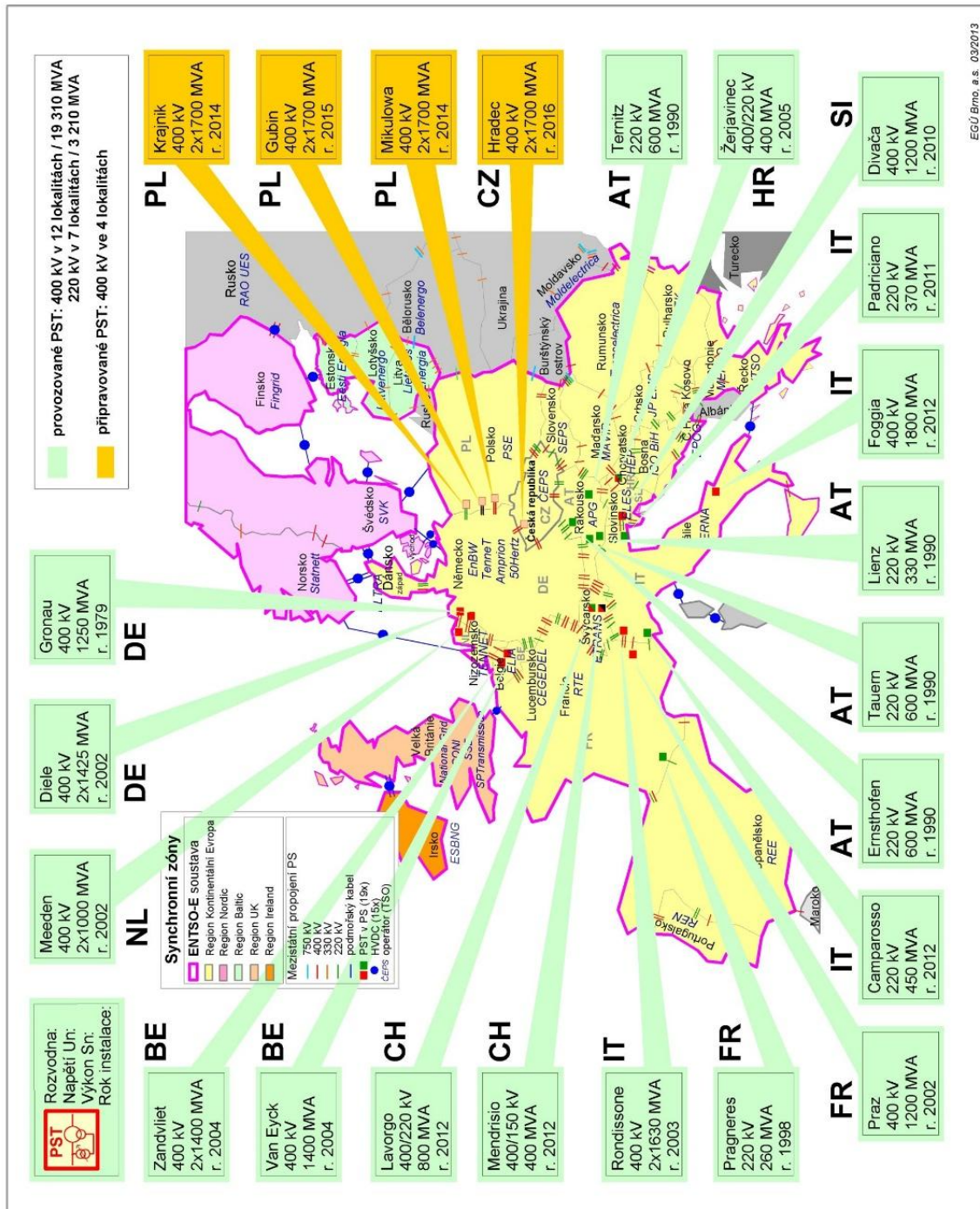
- [15] KAPLINSKY, Joe a Antti SILVAST. VŠB OSTRAVA. *Projekt UNDERSTAND: Zpráva o bezpečnosti evropských rozvodů elektřiny*. Ostrava, 2007, 63 s.
- [16] VNOUČEK, Svatopluk. Řízení toků výkonů v PS: Použití technických prostředků pro řízení propustnosti sítě. [online]. 2005, s. 27 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://svse.aem.cz/>.
- [17] MÁŠLO, Karel. Příčiny a následky velkých výpadků v dodávkách elektřiny. ČEPS, a.s. *Odbornecasopisy.cz* [online]. 2005 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: www.odbornecasopisy.cz/?id_document=26794.
- [18] KOREJČÍK, Michal. *Návrh transformátoru s regulací fáze pro laboratorní výuku*. Brno, 2012. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/>. Diplomová práce. VÚT BRNO. Vedoucí práce ING. MARTIN PAAR Ph.D.
- [19] ERÚ. Roční zpráva o provozu ES ČR: Bilance. [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/>.
- [20] VRBA, Miroslav., dokument Transformátory.docx. 2015, s. 10. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/>.
- [21] PETRUŽELA, Ivan. ČVUT. *Ostrovni provoz: Blackout*. 2006, 32 s. Dostupné z: <http://home.pilsfree.net/fantom/>
- [22] *Regulace toků výkonů v propojených elektrizačních soustavách*. Brno, 2004. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/>. Doktorandská práce. VÚT BRNO. Vedoucí práce Doc. Ing. Evžen Haluzík, CSc.
- [23] HARLOW, James H. *Electric power transformer engineering*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2007, 1 v. (various pagings). ISBN 08-493-9186-5.
- [24] HÁJEK, Josef a Jiřina MERTLOVÁ. VŠSE PLZEŇ. *Respektování funkce transformátoru s proměnným převodem při řešení úloh provozu elektrizační soustavy: REPORT č. 30*. Plzeň: VŠSE V Plzni, 1972. VŠSE 160: 55-054-74-08/1.
- [25] KUBÍN, Miroslav. *Přenosy elektrické energie ČR: v kontextu evropského vývoje*. Praha: ČEPS, [2005]. 567 s.
- [26] Plán rozvoje přenosové soustavy ČR 2014 - 2023. In: Praha: ČEPS, a.s., 2013. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/>

8. Přílohy



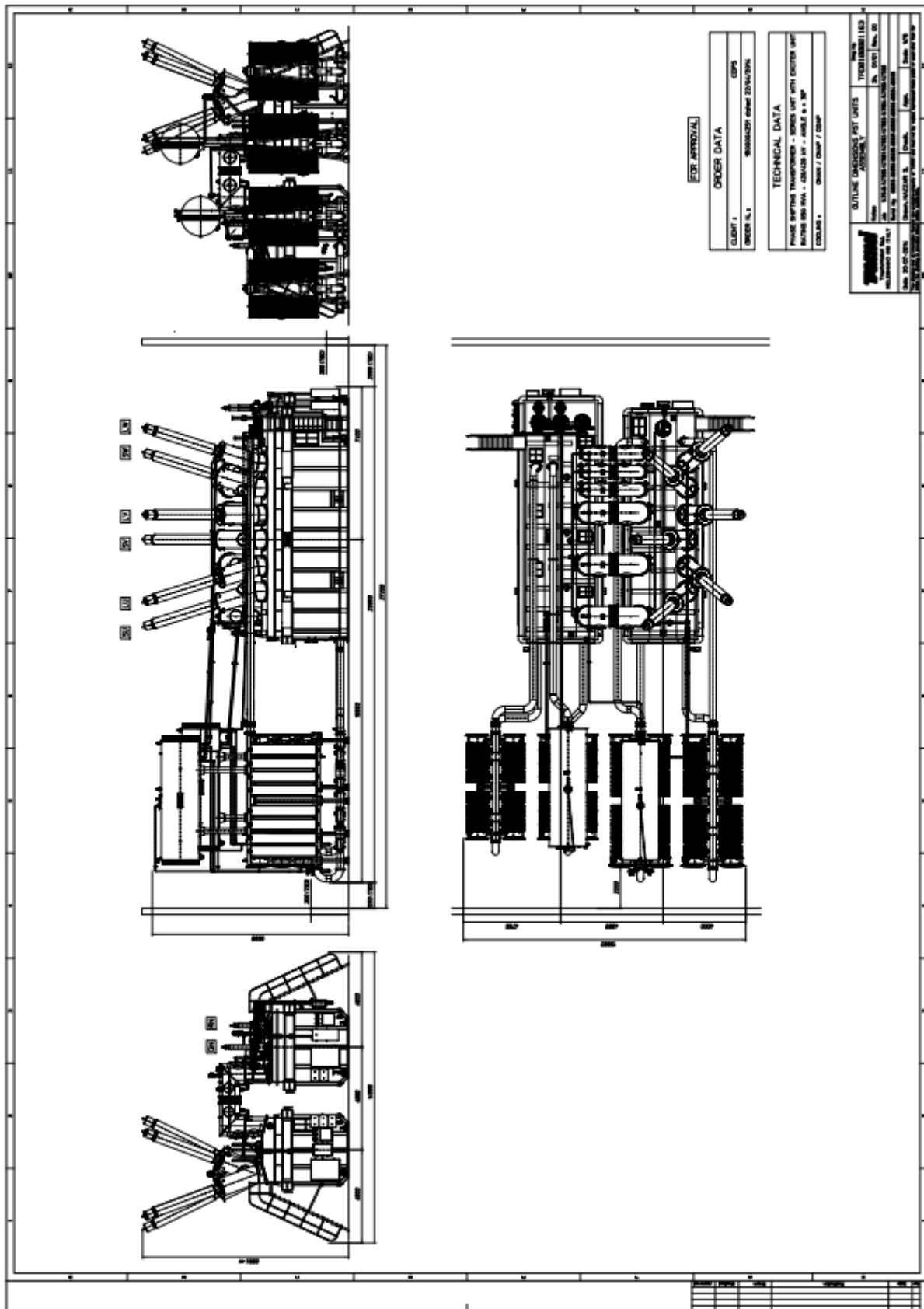
Příloha č. 1 Schéma distribučních a přenosových sítí v ČR [3]

PST (Phase Shift Transformer) provozované a plánované v přenosových sítích ENTSO-E

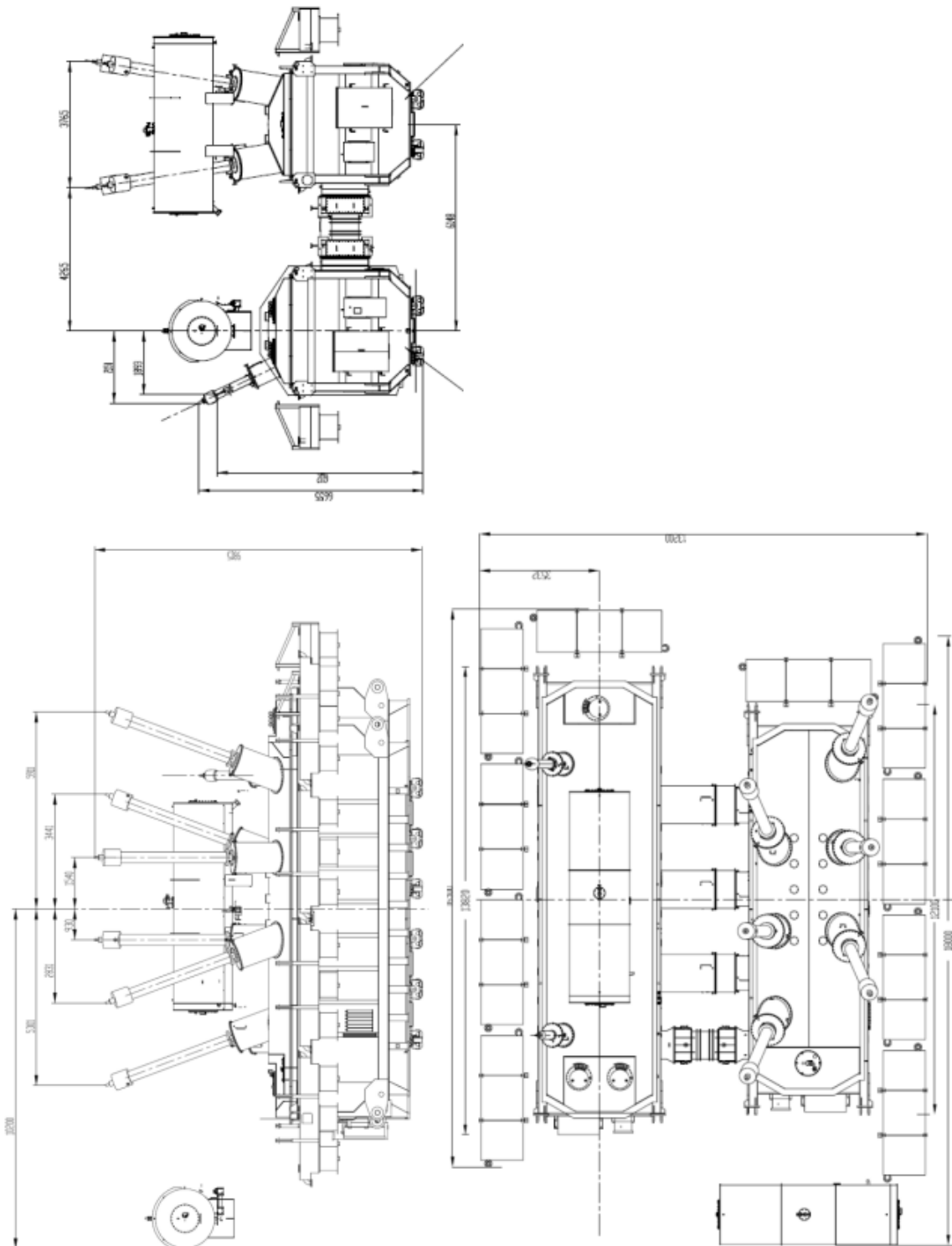


EGU Bmo, a.s. 03/2013

Příloha č. 2 Provozované a plánované PST v Evropě [3]



Příloha č. 3 Rozměry PST od firmy TAMINI (Italie) [3]

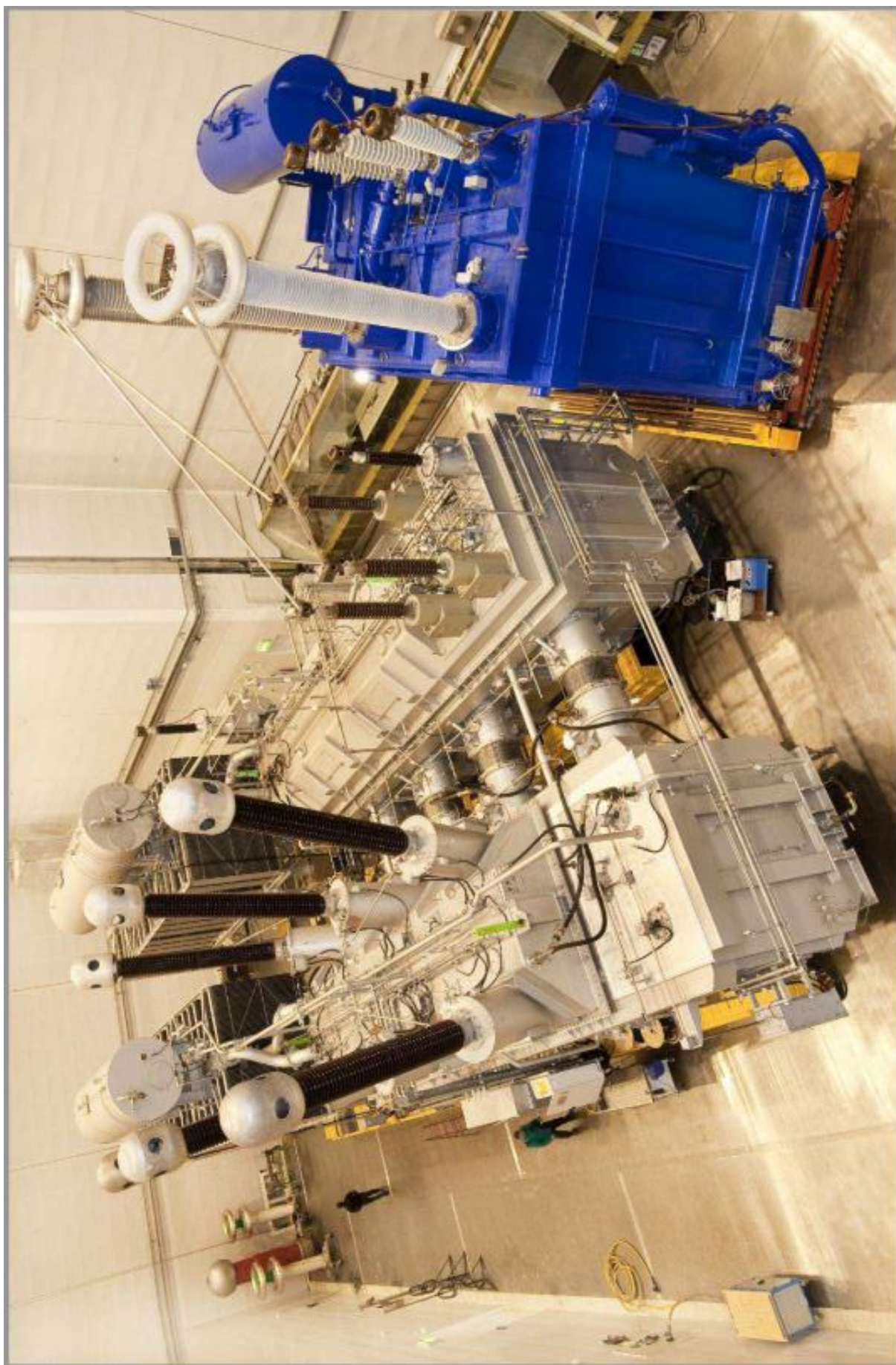


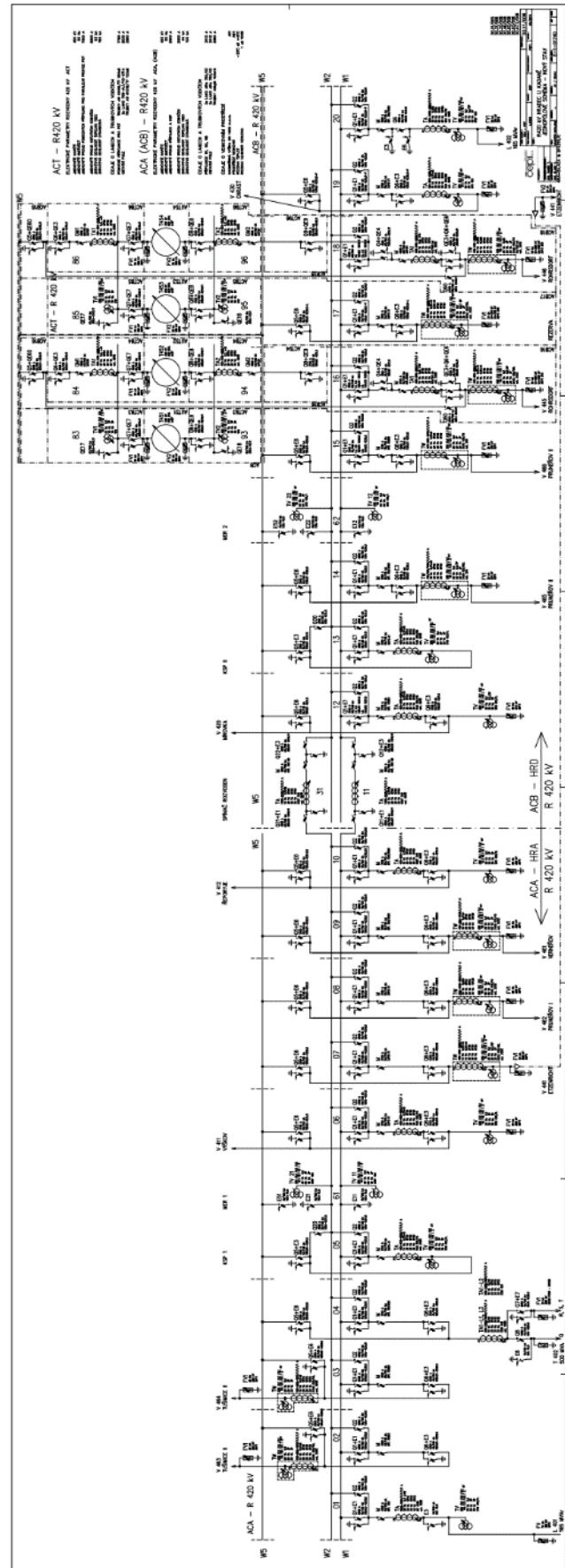
Příloha č. 4 Rozměry PST [3]

Parametry: Max. přenášený výkon $S_n = 1300\text{MVA}$; $U_n = 400\text{kV}$; reg. úhel $\pm 23^\circ$; $V_x \times \text{Š} \times D = 10 \times 13 \times 18\text{m}$; celková hmotnost 950t z toho hmotnost oleje 251t



Příloha č. 5 Rozměry PST [3]





Příloha č. 7 Část jednofázového schématu Hradecké rozvodny s PST [3]

