



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ZAPOJENÍ ČESKÝCH JADERNÝCH ELEKTRÁREN DO SYSTÉMU REGULACE ČINNÉHO VÝKONU

ROLE OF CZECH NPP WITHIN GRID POWER REGULATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN KOSTEČKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAREL KATOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Jan Kostečka

ID: 154773

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Zapojení českých jaderných elektráren do systému regulace činného výkonu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s provozem elektrizační soustavy a s tradiční rolí jaderných elektráren v ní. Popište fungování evropské soustavy ENTSO-E. Zaměřte se zejména na roli francouzských a německých jaderných elektráren v národní i mezinárodní přenosové soustavě.
2. Popište jevy probíhající v posledních letech v otevřené evropské soustavě zejména v souvislosti s německou energetickou revolucí a jejich vlivy na soustavu a provoz velkých energetických bloků.
3. Detailně popište možnosti zapojení českých jaderných elektráren (zejména EDU) do širší regulace činného výkonu a nabídky systémových služeb. Diskutujte pozitiva a negativa.
4. Analyzujte, počítejte, diskutujte vlivy regulace a dlouhodobého provozu bloků na sníženém výkonu či vlastní spotřebě, na plánování odstávek, životnost bloků, navrhování vsázek, využití jaderného paliva.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

1. Lechtenbohmer, S.: Decarbonization and regulation of Germany's electricity system after Fukushima, Climate Policy 13/S1, 2013.
 2. Tang, Y. et al.: The balance of power system peak load regulation considering the participation of nuclear power plant, REET2014, Dalian, China.
- a další podle pokynů vedoucího a konzultanta práce

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce: Ing. Libor Fejta, EDU ČEZ, a.s.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

Bibliografická citace práce:

KOSTEČKA, J. *Zapojení českých jaderných elektráren do systému regulace činného výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Katovský, Ph.D..

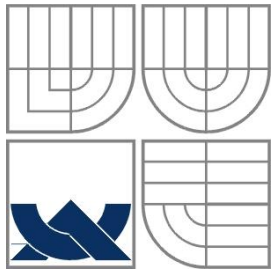
Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval mému vedoucímu této práce Ing. Karlu Katovskému Ph.D. za podporu a pomoc při zpracování daného tématu. Dále za zprostředkování možnosti konzultací v EDU. Také bych rád poděkoval konzultantovi Ing. Liborovi Fejtovi za jeho pomoc a dodanou dokumentaci, která byla užitečná ke zpracování dané problematiky.

V Brně dne Podpis autora



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Bakalářská práce

**Zapojení českých jaderných
elektráren do systému regulace
činného výkonu**

Jan Kostečka

vedoucí: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Konzultant: Ing. Libor Fejta

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2015

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

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

Bachelor's Thesis

Involvement of Czech nuclear power plants to system regulate active power

by

Jan Kostečka

Supervisor: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Co-supervisor: Ing. Libor Fejta

Brno University of Technology, 2015 Brno

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je zapojení českých jaderných elektráren do české energetické sítě, ale především do evropské sítě a jejich přizpůsobení. Vliv rozšíření obnovitelných zdrojů elektrické energie vytváří nesymetrii v síti a vznikají místa s přebytkem elektrické energie a místa s nedostatkem elektrické energie. Toky elektrických energií mohou ovlivnit zabezpečení a celkovou bezpečnost distribučního vedení. Přílišné přetěžování může způsobit až jejich zhroucení. Proto tato práce je zaměřena řešením a zamezením tohoto problému a minimalizováním těchto možných škod. Vliv energetické revoluce má však na tyto přetoky energie v síti obrovský podíl. Neregulovatelný větrný a solární zdroj elektrického proudu může oblastně vytvořit oblast přepětí a tok této energie putuje do míst s nedostatkem elektrického výkonu.

Regulace má velký vliv na palivo. Tato odpadlá výroba by mohla prodloužit palivový cyklus, nebo rozšířit kampaň na víc let, minimálně o rok. Výpočty lze ukázat množství paliva, které lze ještě použít a tím ekonomicky zvýšit výnos a zvýhodnění podmínek pro prodloužení životnosti reaktorových bloků.

KLÍČOVÁ SLOVA: Jaderné elektrárny, Regulace výkonu jaderné elektrárny, Elektrizace soustava, ENTSO-E, Podpůrné služby

ABSTRACT

The aim of the Bachelor's thesis is the involvement of Czech nuclear power plants in the Czech energy networks, but also in the European Network and their adaptation. Effect of expansion of renewable electrical energy produces the asymmetry in the network and places formed with an excess of electrical energy and places with lack of electrical energy. Flows of electric energy can affect the security and safety of distribution lines. Excessive overloading can cause them to collapse. Therefore, this work is focused on solutions and avoids this problem and minimizes this potential damage. However, the impact of energy revolution has a giant proportion about these overflows network energy. Uncontrollable wind and solar power source may create regionally region surge and flow of this energy goes to areas with shortages of electrical power.

The regulation has an impact on fuel. This renegade production could extend fuel cycle, or expand the campaign to more years at least a year. The calculations can show the amount of fuel that can still be used, and thereby increase the yield and economic benefit conditions for extending the life of the reactor units.

KEY WORDS: Nuclear power plant, Power regulation nuclear power plant, Electricity grid, ENTSO-E, Ancillary services

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD.....	14
2 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA.....	15
2.1 ENTSO-E.....	16
3 VÝVOJ ENERGETIKY V EVROPĚ.....	17
3.1 FRANCIE.....	17
3.2 VELKÁ BRITÁNIE	18
3.3 NĚMECKO	19
4 ENERGETICKÁ REVOLUCE A NÁSLEDKY	19
4.1 TRANSFORMÁTOR S REGULACÍ FÁZE	21
4.1.1 POUŽITÍ TRANSFORMÁTORŮ	22
5 ČESKÁ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA.....	23
5.1 KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY	25
5.1.1 SYSTÉMOVÉ SLUŽBY DLE KODEXU	25
5.1.2 PODPŮRNÉ SLUŽBY DLE KODEXU.....	25
5.1.3 PROVOZ ELEKTRÁRENSKÝCH BLOKŮ	27
6 JADERNÁ ENERGETIKA ČR.....	27
6.1 JADERNÁ ELEKTRÁRNA DUKOVANY.....	28
6.1.1 JADERNÝ REAKTOR A PALIVO	29
6.1.2 ELEKTRICKÁ ČÁST EDU.....	32
6.2 JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN	34
6.2.1 VÝROBA A VYVEDENÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE	35
7 REGULACE VÝKONU.....	36
7.1 REGULAČNÍ SYSTÉM BLOKU V JE DUKOVANY	37
7.1.1 REGULACE VÝKONU BLOKU	37
7.1.2 OSTATNÍ REGULAČNÍ SYSTÉMY PODPORUJÍCÍ REGULACI VÝKONU.....	38
7.2 REGULACE VÝKONU JE DUKOVANY.....	38
7.2.1 PLÁNOVÁNÍ A OBCHOD S PODPŮRNÝMI SLUŽBAMI.....	41
7.2.2 PRIMÁRNÍ REGULACE VÝKONU	42
7.2.3 SEKUNDÁRNÍ REGULACE VÝKONU A FREKVENCE.....	42
7.2.4 MINUTOVÁ ZÁLOHA	42
7.2.5 SEKUNDÁRNÍ REGULACE NAPĚTÍ A JALOVÉHO VÝKONU.....	43
7.2.6 SNÍŽENÍ VÝKONU	43
7.2.7 PLNĚNÍ DIAGRAMOVÉHO VÝKONU	43
7.2.8 SCHOPNOST VÝROBY DO OSTROVNÍHO PROVOZU.....	43

7.2.9 SKUPINOVÝ ROZDĚLOVAČ VÝKONU	43
7.2.10 REDISPEČINK.....	43
7.2.11 REGULACE VÝKONU NA VLASTNÍ SPOTŘEBU.....	44
7.2.12 VLIV DLOUHODOBÉ REGULACE NA PROVOZ REAKTORU	49
7.3 REGULACE VÝKONU JE TEMELÍN	50
8 ZÁVĚR.....	51
POUŽITÁ LITERATURA	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Obecné schéma elektrizační soustavy [1].....	15
Obrázek 2	Mapa států v soustavě ENTSO-E[2].....	16
Obrázek 3	Toky elektrické energie způsobené energetickou revolucí[5].....	20
Obrázek 4	Schéma zapojení a vnitřní schéma transformátoru s posuvem fáze[18].	21
Obrázek 5	Část ES zasažená instalací PTS[21].....	22
Obrázek 6	Mapa budoucích či již instalovaných PST[21].	23
Obrázek 7	Elektrizační soustava ČR[4].	24
Obrázek 8	Graf průběhu výroby elektrické energie JE, všech elektráren ČEZ vůči spotřebě elektrické energie ČR[22].	28
Obrázek 9	Jaderná elektrárna Dukovany[12].	29
Obrázek 10	Průběh výkonu 1. reaktorového bloku v roce 2014 v jednotkách MWe[22].	30
Obrázek 11	Průběh výkonu 2. reaktorového bloku v roce 2014 v jednotkách MWe[22].	30
Obrázek 12	Průběh výkonu 3. reaktorového bloku v roce 2014 v jednotkách MWe[22].	31
Obrázek 13	Průběh výkonu 4. reaktorového bloku v roce 2014 v jednotkách MWe[22].	31
Obrázek 14	Turbosoustrojí EDU[15].....	33
Obrázek 15	Jaderná elektrárna Temelín[13]	35
Obrázek 16	Příhraniční toky elektrické energie[5].....	37
Obrázek 17	Struktura komunikace na trhu a regulací elektrické energie[22].	41
Obrázek 18	Informační toky při plánování provozu[22].....	42
Obrázek 19	Graf rozdělení regulačních záloh EDU za rok 2014 v MWh[22].	44
Obrázek 20	Graf rozdělení regulace EDU na telefon v roce 2014[22].	45
Obrázek 21	Graf procentuelního složení obohacným štěpným materiálem před zavezením do reaktoru.	46
Obrázek 22	Graf procentuelního hodnota štěpného izotopu v palivu při nominálním výkonu.	46
Obrázek 24	Průběh uměle vytvořeného výkonu reaktoru, který by uvažoval delší využití podpůrných služeb.	47
Obrázek 23	Graf procentuelního obohacení štěpným izotopem v palivu reaktoru po prvním roce na regulované hodnotě výkonu 260MW.....	47
Obrázek 25	Procentuelní složení paliva se štěpným izotopem po regulovaném provozu jednoho roku.	48
Obrázek 26	Graf obohacení paliva po prvním roce regulace na vlastní spotřebu, která činí 26 MWe.	49
Obrázek 27	Graf průběhu výkonu 1. reaktorového bloku ETE v MWe[22].	51

Obrázek 28 Graf průběhu výkonu 2. reaktorového bloku ETE v MWe[22]. 51

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 3-1 Francouzské jaderné elektrárny[2]</i>	17
<i>Tabulka 3-2 Britské jaderné elektrárny[2]</i>	18
<i>Tabulka 3-3 Německé jaderné elektrárny[2]</i>	19
<i>Tabulka 5-1 Tabulka vztahu mezi systémovými službami a podpůrnými[4]</i>	26
<i>Tabulka 6-1 Vývoj výroby elektrické energie v GWh[22]</i>	28
<i>Tabulka 6-2 Vývoj délky odstávek ve dnech[22]</i>	32
<i>Tabulka 6-3 Výkonové hodnoty každého bloku Dukovan za rok 2014[22]</i>	33
<i>Tabulka 6-4 Výkonové hodnoty každého bloku Temelínu za rok 2014[22]</i>	35
<i>Tabulka 7-1 Typy poskytovaných podpůrných služeb o dané hodnoty[22]</i>	39
<i>Tabulka 7-2 Doba recertifikací podpůrných služeb[22]</i>	40
<i>Tabulka 7-3 Maximální opakování regulace činného výkonu v jednom roku palivové kampaně platné pro jeden reaktorový blok, což znamená pro dvě turbosoustrojí[22]</i>	40
<i>Tabulka 7-4 Možná délka provozu reaktorového bloku v závislosti na velikosti regulované hodnoty výkonu a koncentraci kyseliny borité označená C_B[22]</i>	41
<i>Tabulka 7-5 Typy regulací na každém bloku EDU[22]</i>	45
<i>Tabulka 7-6 Typy regulací na každém bloku ETE[22]</i>	50

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

AGR	Modernější plynem chlazený reaktor	
BWR	Varný reaktor	
ČR	Česká republika	
ČEPS	Česká přenosová soustava, a.s.	
DAMAS	Obchodní elektronický portál společnosti ČEPS, a. s.	
ENTSO-E	Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektrické energie	
ERÚ	Energetický regulační úřad	
ES	Elektrizační soustava	
EU	Evropská unie	
FBR	Rychle množivý reaktor	
GRC	Plynem chlazený reaktor	
HDP	Dispečink ČEPS - Hlavní dispečerské pracoviště Praha	
KOTEL	Koncentrátor terminálů elektráren	
RR	Regulační rozsah	
RZ	Regulační záloha	
RZPR	Regulační záloha primární regulace	
PWR	Tlakovodní reaktor západního typu	
OPV	Objemově plánované výpadky	
TELEDU	Terminál elektrárny Dukovany	
TRIS	Dispečerský řídicí systém záložního dispečerského pracoviště Ostrava	
TSO	Bezpečnostní spolupráce přenosových soustav	
VVER 440	Tlakovodní reaktor východního typu	
VVER 1000	Tlakovodní reaktor východního typu	
T	Čas	s
P	Činný výkon	We
U	Elektrické napětí	V
I	Elektrický proud	A
f	Frekvence	Hz
Q	Jalový výkon	Var
P	Tepelný výkon	Wt

1 ÚVOD

Vlivem stárí jaderných elektráren, zejména v Německu bude docházet k tomu, že evropská síť může být více přetěžovaná. Tuto zátěž bude velice ovlivňovat vliv větrných elektráren na severu Německa a fotovoltaických elektráren na severu Německa. Za působení fyzikálních zákonů se bude elektrický tok přesouvat nejmenší cestou odporu a to přes Českou republiku. Již nyní máme občas problém s naší elektrizační soustavou a musíme kvůli dražší – fotovoltaické a větrné vyrobené elektrické energii regulovat levnější – jadernou. Zatím regulace těchto zdrojů není tak značná a můžeme regulovat tepelné elektrárny.

Role jaderných elektráren v české elektrizační soustavě je značná, když si vezmeme, že cca. 40% celkově spotřebované elektrické energii vyrobí pouze jaderné elektrárny. V Dukovanech máme 4 bloky VVER 440 s celkovým výkonem 2040 MW a v Temelíně 2 bloky VVER 1000 s celkovým výkonem 2133 MW. Největší podíl našeho energetického mixu mají tepelné elektrárny, které převyšují výrobu jaderných elektráren, ale regulace tepelných elektráren je velkým problémem především z hlediska technického a také ekonomického. U jaderných elektráren podporování těchto služeb je z hlediska technického výhodnější, ale i ekonomičtější. Jaderné elektrárny vlastní státní akciová společnost ČEZ a.s. Provozovatelem přenosových soustav, na které jsou připojeny jaderné elektrárny, je ČEPS a.s. Tyto společnosti musí být v zájemně propojení, aby se udržovala rovnováha mezi výrobou a spotřebou.

Cílem této práce je seznámení s principem a typy regulací zejména jaderné elektrárny Dukovany. Dále vlivem regulace může vzniknout problém s odpadlou spotřebou, pokud by bylo potřeba regulovat více, než jsou dané limity. Jsou ukázány demonstrační výpočty pro různé typy regulaci a nominálním provozem reaktorového bloku.

2 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA

Elektrizační soustava je definována jako vzájemné propojení zařízení. Rozdělení součástí elektrizační soustavy podle charakteru:

1) Výrobní

Výrobní elektrické energie, jejíž instalovaný výkon dosahuje až tisíců megawatt. Největších výkonů dosahují jaderné elektrárny. Další typy jsou např.: tepelné, vodní, fotovoltaické a větrné.

2) Přenosový

Prvky, sloužící pro přenos, transformaci, distribuci elektrické energie mezi které patří také elektrické přípojky.

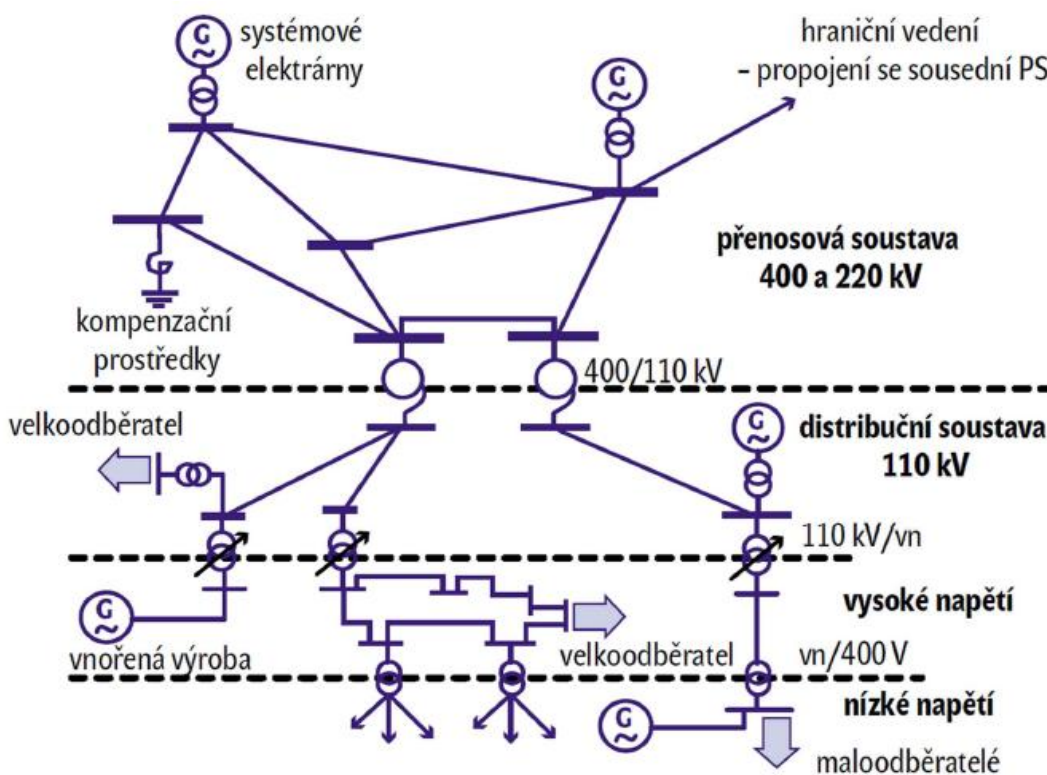
3) Systémový

Zde patří obvody pro měření, ochranu, řízení, zabezpečování, informaci a telekomunikaci

4) Užitkový

Konečným bodem elektrizační soustavy, kde se energie přemění a využije.

Elektrická síť je vzájemné propojení elektráren a koncových spotřebitelů elektrické energie. Nejčastěji využívaná forma elektrické sítě podle proudové charakteristiky je střídavě, avšak občas se používá stejnosměrná forma elektrické sítě. Na obr. 1. lze vidět obecné schéma elektrizační soustavy[1].



Obrázek 1 Obecné schéma elektrizační soustavy [1]

Síť lze také rozdělit podle jejího účelu:

- 1) přenosové (přenos velkých výkonů na velké vzdálenosti);
- 2) distribuční (distribuce elektrické energie na menší vzdálenosti přímo k odběrateli);
- 3) Průmyslové (průmyslové využití elektrické energie vysokého napětí).

2.1 ENTSO-E

ENTSO-E (European Network of Transmission Operators for Electricity) je evropská síť provozovatelů elektroenergetických přenosových soustav. Tato evropská skupina navazuje na již dosavadní evropské sdružení provozovatelů přenosových soustav TSO. Tuto soustavu tvoří synchronně pospojovaný systém 34 zemí Evropy (členských i nečlenských EU) a 41 evropských provozovatelů přenosových soustav. Tato unie vznikla zejména pro účely vzájemné výměny elektřiny, zvýšení stability všech evropských soustav a především řešení poruch a havarijních vlivů na elektrickou síť, zejména z obnovitelných zdrojů. Všechny státy se musí řídit závaznými pravidly tzv. kodexem přenosových soustav.



Obrázek 2 Mapa států v soustavě ENTSO-E[2].

Přínos této spolupráce elektrizačních soustav států je v souvislosti s energetickou revolucí a dopady na elektrizační síť zejména v rozložení elektrické energie a tím nezatížení soustavy, které by mohlo vést až k rozpadu sítě a vznik tzv. „blackout“ režimu. Tím je odpovědná na regulaci napětí a kmitočtu činného a jalového výkonu v soustavě. Díky soustavě se elektrárny musí přizpůsobit danému řádu a popřípadě regulovat jejich výrobu, což znamená odstavení určité výroby z hlediska možnosti.

Nejdůležitějším přínosem této soustavy je řešení a likvidace vzniklé poruchy, dodání energie a dosažení požadovaných hodnot v elektrizační síti. Nádhernou ukázkou této spolupráce je incident, který se stal 28. 9. 2003 v Itálii, kdy se celá Itálie ocitla ve „tmě“. Obnova soustavy sítě

trvala přibližně 16 hodin, kdy byli připojeni nejdůležitější části. Frekvence sítě v Evropě však stoupla o nepatrné 0,02 Hz [1].

3 VÝVOJ ENERGETIKY V EVROPĚ

Jaderné elektrárny jsou v Evropě největšími výrobci elektrické energie a tvoří základní pilíř pro elektrizační soustavu. Největší vlastníci jaderných elektráren jsou:

1. Francie
2. Velká Británie
3. Německo

3.1 Francie

Francie má obrovský podíl výroby elektrické energie z jádra, který činí 78,65% . Je to díky obrovskému vývoji a výzkumu jádra, závodům na zpracování jaderného paliva a firmě AREVA, která staví jaderné elektrárny. Většina reaktorů je z 80.-90. let minulého století. Francie provozuje celkem 58 reaktorů především tlakovodního typu (PWR), 12 reaktorů má již odstavených a 1 reaktor typu EPR (typ reaktoru PWR generace III+). Ročně celková produkce elektrické energie z jádra je 420,1TWh. Zde jsou JE a jejich bloky všechny, nebo některé již odstavené. Nyní pokud by Francie nepožádala o prodloužení životnosti některé z jaderných elektráren, mohla by z jádra využívat energii pouze do roku 2030, což by byla pouze jeden blok Civaux, ostatní by byli uzavřeny během roku 2025 [2]:

Tabulka 3-1 Francouzské jaderné elektrárny[2]

Název JE	Typ reaktoru	Výkon reaktorů (instalovaný)[MW]	Čistý výkon [MW]	Počátek výroby	Poznámky
Belleville	PWR	2x1365	2x1310MW	1987-88	
Bugey	PWR	2x955+2x937	2x920+2x900	1978-79	Jeden blok již uzavřen
Cruas	PWR	2x956+2x921	2x915+2x880	1983-84	
Cattenom	PWR	4x1362	4x1300	1986-91	
Civaux	PWR	2x1520	2x1495	1997-2000	
Dampierre	PWR	4x937	4x890	1980-81	
Fessenheim	PWR	2x920	2x880	1977	
Flamanville	PWR	2x1382	2x1330	1985-86	V plánu postavit 1x1600MW EPR
Golfech	PWR	2x1365	2x1310	1990-93	
Gravelines	PWR	6x951	6x910	1980-85	

Název JE	Typ reaktoru	Výkon reaktorů (instalovaný)[MWe]	Čistý výkon [MWe]	Začátek výroby	Poznámky
Chinon	PWR	3x954+870	(3x905+870)	1982-87	
Chooz	PWR	2x1520	2x1985	1996-97	Jeden blok již uzavřen
La Blayais	PWR	4x951	4x910	1981-83	
Paluel	PWR	4x1382	4x1330	1984-86	
Penly	PWR	2x1382	2x1330	1990-92	
Saint Alban	PWR	2x1381	2x1335	1985-86	
Saint Laurent	PWR	2x956	2x915	1981	
Tricastin	PWR	4x955	4x915	1980-81	

3.2 Velká Británie

Velká Británie má celkem 17 reaktorů typu AGR a GCR, jejíž výroba pokryje 15% celkové spotřeby celého státu. 27 reaktorů je odstavených. Celkově se ročně vyrobí 57,5 TWh. Zde jsou reaktory zcela či částečně funkční[2]:

Tabulka 3-2 Britské jaderné elektrárny[2]

Název JE	Typ reaktoru	Výkon reaktorů (instalovaný) [MWe]	Čistý výkon [MWe]	Začátek výroby	Poznámky
Wylfa	GCR	2x565	2x475	1971	
Torness	AGR	2x682	2x625	1988-89	
Sizewell	PWR	1258	1188	1995	V provozu poslední blok
Hunterston	AGR	2x523	2x575	1976-77	Dva bloky již uzavřeny
Hinkley Point	AGR	2x670	2x625	1976	Dva bloky již uzavřeny
Heysham	AGR	2x575+4x670	2x575+2x626	1983-88	
Hartlepool	AGR	2x650	2x605	1983-85	
Douness	GCR	2x575	2x555	1983-89	Dva bloky již zavřeny

3.3 Německo

Německo má celkem 18 funkčních reaktorů, jenž vyrobí ročně přes 158,01 TWh. Celkový podíl jádra v německé energetické síti to je asi 29,9%, avšak toto číslo se do roku 2022 změní, protože většina funkčních jaderných bloků je z 80. let se chystá ukončit svůj podíl výroby z jádra. Příčinu tohoto rozhodnutí má za následek energetická revoluce, která se odehrává především v Německu [2].

Tabulka 3-3 Německé jaderné elektrárny[2]

Název JE	Typ reaktoru	Výkon reaktorů (instalovaný) [MW]	Čistý výkon [MW]	Začátek výroby	Poznámky
Kalkar	GCR	327	300	-	Stavba zastavena
Stendal	VVER 1000	1000	980	-	Stavba zastavena
Neckarwestheim	PWR	1365	1269	1976-89	
Phillipsburg	PWR	1424	1358	1979-84	
Brokdorf	PWR	1440	1370	1986	
Emsland	PWR	1363	1290	1988	
Grafenrheinfeld	PWR	1345	1275	1981	
Grohnde	PWR	1430	1360	1984	
Gundremmingen	BWR	1344	1284+1288	1984	Jeden blok již uzavřen
Isar	PWR	1455	1380	1988	Jeden blok již uzavřen

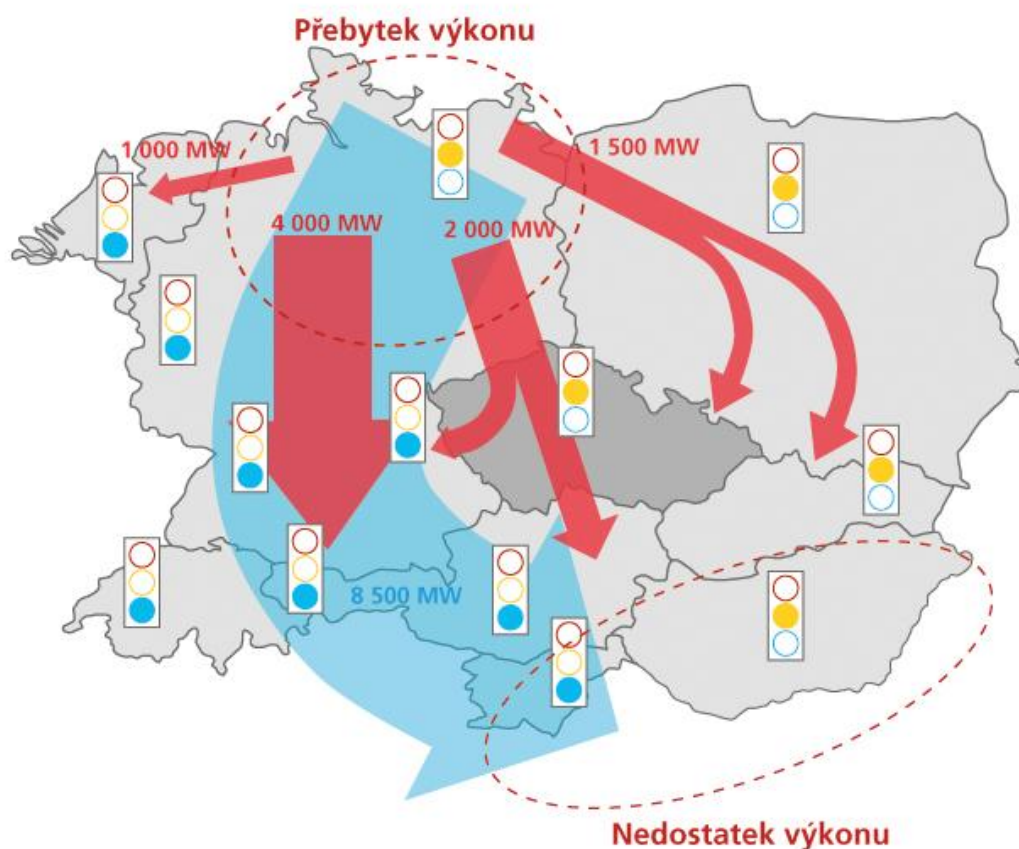
4 ENERGETICKÁ REVOLUCE A NÁSLEDKY

Tuto revoluci rozpoutala jaderná havárie, která se stala 11. března 2011. Došlo k zemětřesení a následně vlně tsunami, kdy došlo poškození všech 4 bloků jaderné elektrárny Fukušima. Tímto datem se začalo více testovat bezpečnost jaderných elektráren a strach z následků přírodních podmínek na budovu a funkčnost elektrárny. Německé jaderné elektrárny, které se budovaly v 70. a 80. letech 20. Století se politická vláda rozhodla v polovině roku 2011, uzavře 8 nejstarších jaderných elektráren a do roku 2022 uzavřít dalších 9, avšak před touto událostí uvažovali o prodloužení životnosti. V Itálii, kde bylo vypsáno referendum výstavby jaderných elektráren na pokrytí spotřeby až do roku 2030 je zrušeno. Dále Švýcarsko ukončí výrobu elektrické energie z jádra po skončení životnosti svých 5 jaderných elektráren. Těndr na dostavbu dvou bloků ETE, byl taky roku 2014 zrušen[9].

Německo vytvořilo plán na nahrazení odpadlé výroby elektrické energie elektrárnami fotovoltaickými, větrnými a bioplynovými. V roce 2013 přibýlo okolo 7000 MW výkonu obnovitelných zdrojů. Německé větrné elektrárny, které jsou především umístěny na severu

Německo, způsobují již teď problémy v distribuční soustavě. Dále v zemích EU se předpokládá nárůst větrných elektráren do roku 2020 o 180 000 MW a do roku 2030 až o 300 000 MW. Tyto tzv. větrné farmy, které se budou zejména umísťovat k přímořským oblastem v roce 2030. Suma jejich výkonu bude okolo 135 GW. Tento problém bude ohrožovat celou elektrizační soustavu zejména ve Střední Evropě.

Pro tento problém by měl vymyslet program, který se jmenuje Windspeed, který se zabývá energií z větrných elektráren. Na tomto projektu spolupracují experti z Velké Británie, Nizozemska, Norska, Belgie, Dánska a Německa. Tyto větrné farmy, o rozloze stovek kilometrů čtverečních a vzdálených 20 kilometrů od břehů Německa, z důvodu kvalitních větrných podmínek by mohly narušovat evropskou energetickou síť. Proto by se postavila evropské inteligentní supersítě (tzv. super smart grid). Tato síť by využívala technologii HVDC, což je vysokonapěťové vedení stejnosměrné elektrické energie, které má velké výhody. Především se hodí pro nesymetrické dálkové vedení, jelikož u střídavých sítí jsou na vedení ztráty jak frekvenční, tak výkonové. U stejnosměrného napětí by frekvenční ztráty odpadly. Další výhodou stejnosměrného vedení je, že se může skládat pouze ze dvou vodičů oproti střídavého třífázového vedení. [5]

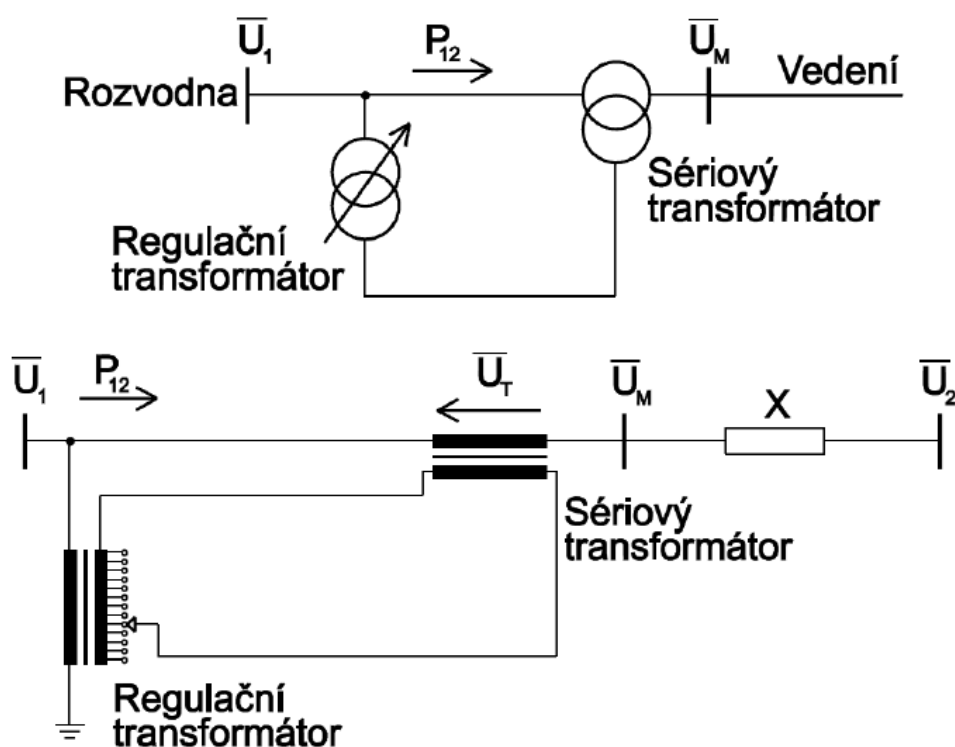


Obrázek 3 Toky elektrické energie způsobené energetickou revolucí[5].

Toky se budou chovat podle Kirchhoffových zákonů a přes ČR budou protýkat výkony na Balkán. Proto naše síť je navrhována dle bezpečnostního kritéria N-1. Princip kritéria N-1 je takový, že po výpadku jednoho libovolného prvku je provoz bez větších komplikací schopen dále fungovat. Další možností řešení přetoků a ochrany státních elektrizačních sítí jsou transformátory s možností regulace fáze [5].

4.1 Transformátor s regulací fáze

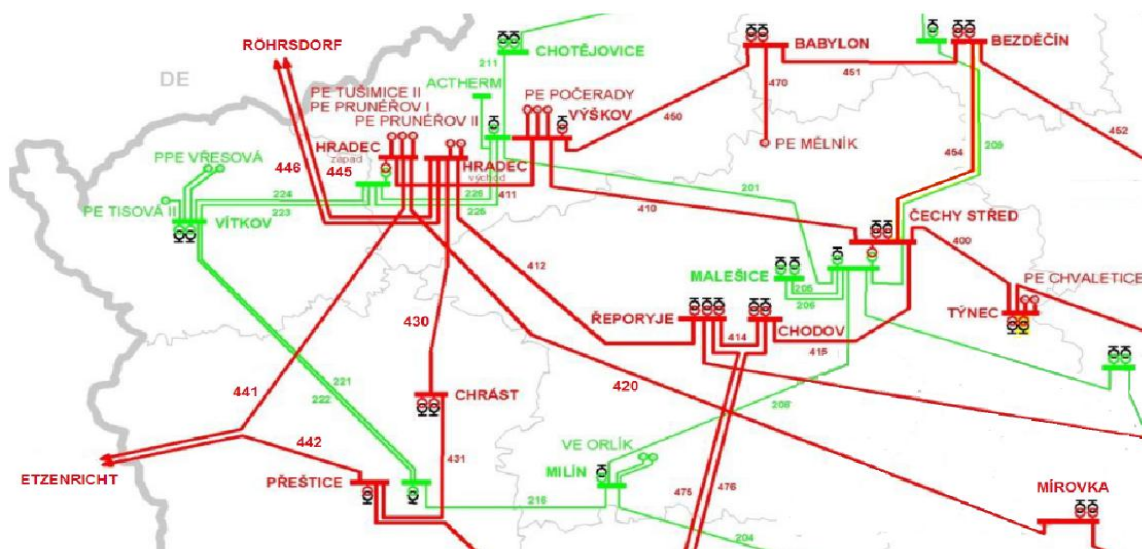
Tyto zařízení (angl. Phase shifter) se instalují přímo do elektrizační soustavy do rozvodu vvn a zvn. Tento způsob řízení toků v přenosové soustavě je nevhodnější, kdy se řídí zatížení vedení. K řízení činného výkonu složí tento transformátor, který se skládá ze dvou transformátorů. Příčný či paralelní transformátor, který slouží k vytvoření fázového napětí, jež ovládá velikost napětí díky možnosti přepínání fázového posunutí. Další sériový transformátor, který je umístěn do série s vedením a reguluje velikost pootočeného výsledného napětí. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 3. Transformátor nezamezuje přetok energie z příhraničí, ale umožňuje lépe ovládat obrovské nárazové toky za možnosti je absorbovat a dál je bez většího zatížení přenést dále po síti. Nákupní cena se oproti klasickým transformátorům podstatně zvýší z důvodu technologie, ale i materiálů. Objemově jsou tyto transformátory dvakrát větší a dosahují mnohem větších výkonů a hmotnostně přesahují stovky tun.



Obrázek 4 Schéma zapojení a vnitřní schéma transformátoru s posuvem fáze[18].

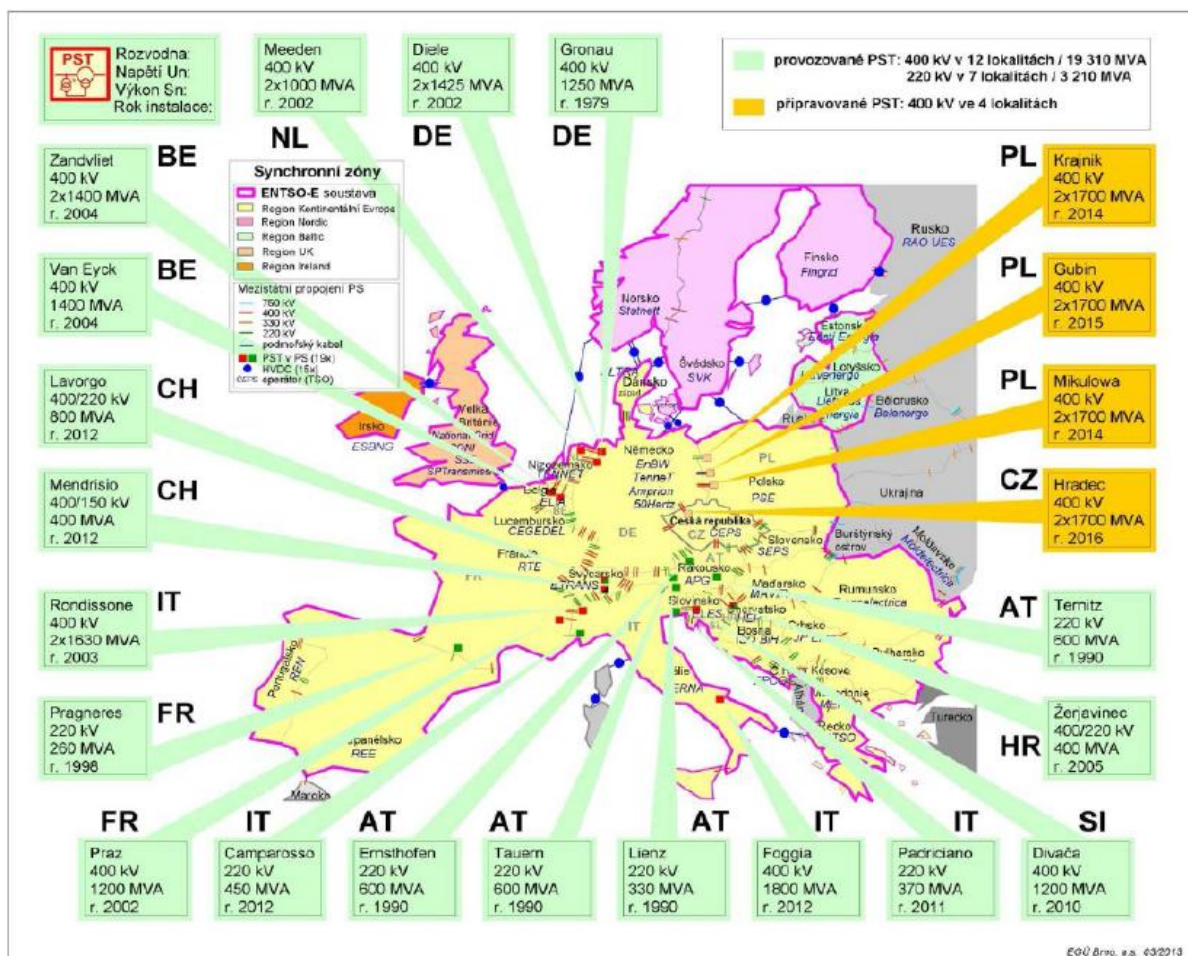
4.1.1 Použití transformátorů

Dohoda mezi provozovateli PS ČEPS a 50Hertz již roku 2013, kdy se nainstalují tyto transformátory na dvě vedení mezi Hradcem a Röhrsdorfem, by instalace a zprovoznění tohoto zapojení mělo být koncem roku 2016. Instalace čtyř transformátorů na dvou linkách v rozvodně Hradec a další dvou v rozvodně Röhrsdorf. Tyto transformátory o výkonu 1200 MVA, které se mohou přetížít až o 20%, což je 1440 MVA, s posunem 20° a 65 odbočkami, kdy každý se odbočka dá nastavit v rozmezí od -32 po $+32$. Nominální napětí o hodnotě 410 kV. Jak v rozvodně Hradec, tak i v Röhrsdorfu mohou být tyto transformátory přemostěny nebo přepojeny na jiné propojovací vedení v případě řešení technické poruchy či zmírnění ztát, kdy nebude potřebné využívat fázový posun. V nejhorším případě mohou posunout fázi až o $\pm 50^\circ$. Koordinace zapojení a posunu musí být sešraná a v souladu s dovolenými pravidly.



Obrázek 5 Část ES zasažená instalací PTS[21].

Koncem roku 2016 by mělo být dokončeno vybavení těmito transformátory i německo-polské hranice, kdy tato povinnost je dána v Polsku energetickým zákonem. Běžně se již používají v Rakousku, Francii, Belgii, Nizozemsku, Slovinsku a Itálii [20].



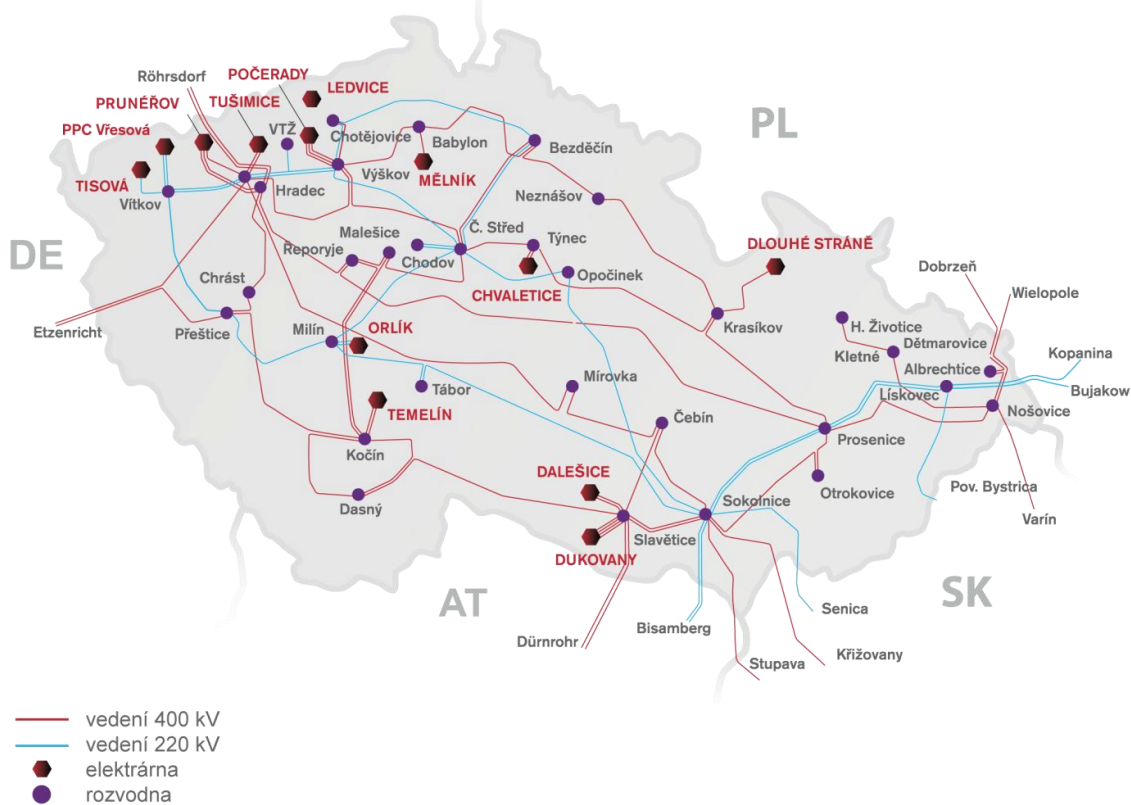
Obrázek 6 Mapa budoucích či již instalovaných PST[21].

5 ČESKÁ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA

Naše soustava je pod vlastnictvím společnosti, která má na ni licenci, a to je ČEPS, a.s. Na její činnost dohlíží Energetický regulační úřad. Jak celá evropská soustava se musí řídit Kodexem, tak i ČEPS je povinen tyto přísné pravidla[5]:

- Zajistit bezpečnost a spolehlivost přenosu energie v ES dle daných norem včetně mezisystémových připojení a provádění patřičných údržeb.
- Řídit tok energii ze sousedních států dle patřičných smluv.
- Zajištění systémových služeb pro přenosovou soustavu pro ČR a pro okolní státy.
- Vývoj a rozvoj sítě vedení po celé ČR.

Schéma rozvodné sítě v ČR



Obrázek 7 Elektrizační soustava ČR[4].

Dále ČEPS, který provozuje přenosovou soustavu, zajišťuje tyto systémové služby:

1. Udržovat kvalitu elektrické energie, využívající tyto technicko-organizační prostředky:
 - Souhrnné udržování výkonové zálohy pro primární regulaci frekvence
 - Sekundární regulaci frekvence a činného výkonu;
 - Sekundární regulaci napětí v soustavě;
 - Terciální regulaci napětí sítě;
 - Udržení pravidelného sinusového tvaru napětí;
 - Zajistit stabilitu a kvalitu dodávky.
2. Pro okamžité udržení výkonové rovnováhy v ES využívá tyto prostředky:
 - Sekundární regulaci frekvence a činného výkonu;
 - Terciální regulaci výkonu;
 - Využití dispečerské zálohy energetických bloků.
3. Obnovení provozu a dodávky elektrické energie za využití:
 - Plán obnovy provozu přenosové sítě;
 - Ostrovní provoz vycházející z Podpůrných služeb;
 - Start ze tmy vycházející z Podpůrných služeb.

4. Dispečerské řízení provozu přenosové soustavy využívá kromě předchozích prostředků i tyto:

- Plán obrany a provozních instrukcí pro zajištění bezpečnosti;
- Zapojení sítě, redispečink a protiobchod pro řízení propustnosti sítě vůči tokům činného výkonu.

Hlavním poskytovatelem systémových služeb PS jsou uživatelé sítě, kdy elektrárenské bloky poskytují výkonovou regulační zálohu, kterou pak sám provozovatel PS certifikuje vlastníkově zdroje elektrické energie. Tyto služby jsou nazývány jako Podpůrné služby (PpS). Kapacita výkonu musí být určena v závislosti na technických parametrech kodexu.

Sám provozovatel PS je hlavním obchodníkem s elektrickou energií, který využívá podpůrné služby a jsou sepsány obchodními zákony se smlouvami mezi jak spotřebiteli, tak i mezi ostatními poskytovateli PS jiných států.

5.1 Kodex přenosové soustavy

V tomto kodexu jsou sepsány pravidla a normy pro celou elektrizační soustavu, kterou se musí řídit každá síť připojená k soustavě ENTSO-E. Z tohoto vyplývají systémové služby. V ČR tyto kodexy jsou podepsány a schváleny ERU. V kodexu jsou sepsány dané služby a přesně definované postupy při potřebném využití.

5.1.1 Systémové služby dle kodexu

Služby, které musí provozovatel zajistit z pohledu bezpečnosti a spolehlivosti ES v ČR s návazností na mezinárodní spolupráci ENTSO-E. Touto službou by mělo být dosaženo potřebných parametrů a požadavky pro provoz soustavy. Mezi tyto služby patří:

- V případě nehody usilovat o obnovení provozu.
- Udržování rovnováhy mezi vyrobenou a spotřebovanou energií
- Dispečerské řízení sítě
- Dodržování normovaných hodnot elektrické energie.

5.1.2 Podpůrné služby dle kodexu

Podpůrné služby zajišťuje systém a kontrolu rozdílů mezi výrobou daných elektrárenských bloků a spotřebou neboli poptávkou. Kodex doslovně definuje, jak tyto podpůrné služby plnit, jak z hlediska elektrotechnického, tak z pohledu ekonomického. Všichni členové připojení do ES mají z hlediska právního nárok tyto služby nabízet. Díky systémovým službám, které se snaží regulovat velikosti elektrických toků v síti je regulace rozdělena do několika oddílů. Regulace energetického bloku, kdy se hodnota regulace značí RR, může dosahovat jak kladných hodnot (označována jako +RZ), skutečný výkon převyšuje smluvní dodávku energie, nebo záporných hodnot (označována jako -RZ), kdy skutečný výkon je nižší než smluvní hodnota energie.

Poskytování podpůrných služeb, které certifikuje provozovatel PS provozovateli energetického bloku pro správný chod ES je mnoho. Zde jsou nejdůležitější podporované služby:

1. Primární regulace frekvence bloku (PR)
2. Sekundární regulace činného výkonu bloku (SR)
3. Terciální regulace činného výkonu bloku (TR)

4. Rychle startující desetiminutová záloha (QS10)
5. Rychle startující patnáctiminutová záloha (QS15)
6. Dispečerská záloha (DZ)
7. Změna zatížení (ZZ30)
8. Snížení výkonu (SV30)
9. Vltavská regulační soustava (SVR)
10. Sekundární regulace napětí a jalového výkonu (SRUQ)
11. Schopnost provozu bloku v ostrovním provozu (OP)
12. Startu elektrárenského blok ze tmy (BS)

Základními podpůrnými službami pro řízení výkonu a frekvence v ES jsou PR, SR a TR.

Tabulka 5-1 Tabulka vztahu mezi systémovými službami a podpůrnými[4].

Systémové služby	Technicko-organizační prostředek	Provozovatelé elektrárenských bloků
Udržování kvalit elektrické energie	Udržování celkové výkonové zálohy	Primární regulace frekvence bloků
	Sekundární regulace napětí	Sekundární regulace napětí a jalového výkonu
	Sekundární regulace frekvence a činného výkonu	Sekundární regulace výkonu
Udržení výkonové rovnováhy v síti	Terciální regulace v síti	Rychle startující záloha do 15 minut
		Snížení výkonu bloků
		Minutová záloha
	Zajištění dispečerské zálohy	Dispečerská záloha
Obnovení provozu		Start ze tmy nebo ostrovního provozu

5.1.2.1 Primární regulace frekvence a činného výkonu bloku

Primárním úkolem primární regulace je zvýšení či snížení výkonu bloku z důvodu snížení či zvýšení frekvenční odchylky, od nominální hodnoty 50 Hz. Výchylka může vzniknout například výpadkem významného energetického zdroje, nebo změnou zátěže v dané oblasti. Regulace musí proběhnout řádově do několika sekund. Matematicky lze tento postup popsat:

$$\Delta P = -\lambda * \Delta f \quad [MW, \frac{MW}{Hz}, Hz], \quad (5.1)$$

kde λ představuje výkonové číslo pro regulační oblast, Δf je odchylka od nominální hodnoty frekvence. Proto každý provozovatel elektrárenského bloku musí udržovat určitou výkonovou zálohu pro nabízení těchto služeb. Když se lokálně změní frekvence v elektrizační síti dle řádu soustavy ENTSO-E o 200mHz, je povinen provozovatel výrobního bloku do třiceti vteřin zvýšit, pokud frekvence v síti klesla pod hodnotu 49,8 Hz, nebo snížit výkon, když je naopak hodnota

frekvence sítě 50,2 Hz o přesně určenou hodnotu, což je pro českou elektrizační soustavu hodnota 84 MW.

5.1.2.2 Sekundární regulace frekvence a činného výkonu bloku

Provozovatel elektrárenského bloku je povinen při této regulaci dosáhnou požadovanou hodnotu výkonu do 15 minut, kdy vznikla výkonová nerovnováha. Hodnota regulovaného výkonu závisí na hodnotě Dispečinku ČEPS, nebo na maximální regulované hodnotu elektrárenského bloku. Regulace výkonu musí být plošně symetrická. Kvalita poskytování této služby se odvíjí od rychlosti regulace na požadovanou hodnotu. Výpočet požadované hodnoty pro regulaci lze vypočítat jako:

$$G = \Delta P + K * \Delta f \quad [MW, MW, \frac{MW}{Hz}, Hz], \quad (5.2)$$

kde ΔP značí odchylka výkonu jiných bloků od plánované hodnoty. Písmenem K se značí parametr, který se teoreticky rovný λ a Δf je jako v předchozím případě změna frekvence od nominální hodnoty. Sekundární regulace činného výkonu navazuje na primární regulaci výkonu.

5.1.2.3 Terciální regulace výkonu bloku

Terciální, neboli točivá regulace činného výkonu navazuje na sekundární regulaci. Hodnotu potřebnou pro regulaci udává Dispečink ČEPS a je označená při snižování výkonu – RZTR, při zvyšování výkonu je označována +RZTR. Dle potřeby je možné využít takzvanou točivou zálohu, nebo dle potřeby rychle startující zálohu.

Po požádání dispečinku je poskytovatel povinen do 30 minut regulovat výkon bloku nebo být schopen úplného odstavení výrobního bloku. Dále je povinen udržet tuto hodnotu minimálně 24 hodin od doby, kdy bylo toto rozhodnutí oznámeno. [17].

5.1.3 Provoz elektrárenských bloků

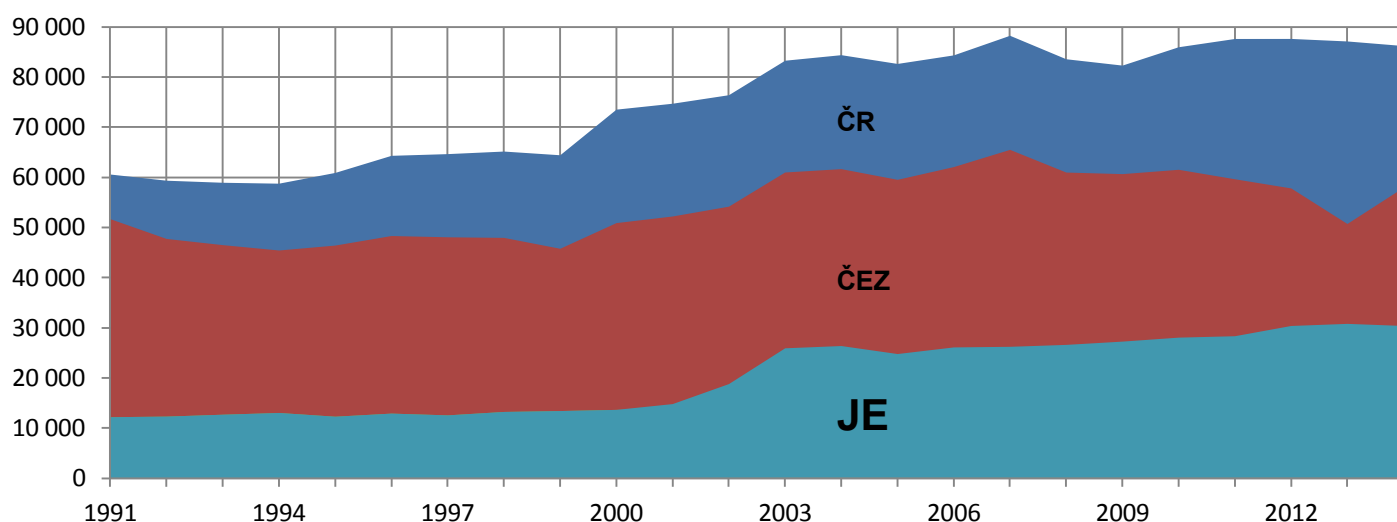
Podmínkou, pro provozování elektrárenského bloku je, aby generátor (v našem případě turbogenerátor) se pohyboval ve frekvenčním pásmu 48,5-50,5 Hz. Napětí na svorkách generátoru musí být schopen udržovat na rozmezí 95-105% nominálního napětí. Elektrárenský blok vybaven parní nebo plynovou turbínou musí v případě potřeby okamžitě a bezpečně přejít z pracovního režimu do režimu vlastní spotřeby a udržet tento stav na minimální dobu, což je dvě hodiny. Dále musí odolat vůči poruchám v síti, které by mohli poškodit, či jinak narušit chod elektrárenského bloku. V případě ostrovního režimu mu být schopen automaticky nebo na pokyn dispečera měnit výkon a frekvenci v soustavě[4].

6 JADERNÁ ENERGETIKA ČR

Jaderné energetika má podíl 35,2% na velikosti výroby elektrické energie v energetickém mixu České republiky. Největší podíl výroby má stále parní elektrárny. V České republice máme 2 jaderné elektrárny. Jedna se nachází v Jižních Čechách – Temelín. Druhá se nachází na Vysočině poblíž Třebíče – Dukovany. V mé práci se budu zabírat především jadernou elektrárnou Dukovany.

Tabulka 6-1 Vývoj výroby elektrické energie v GWh[22].

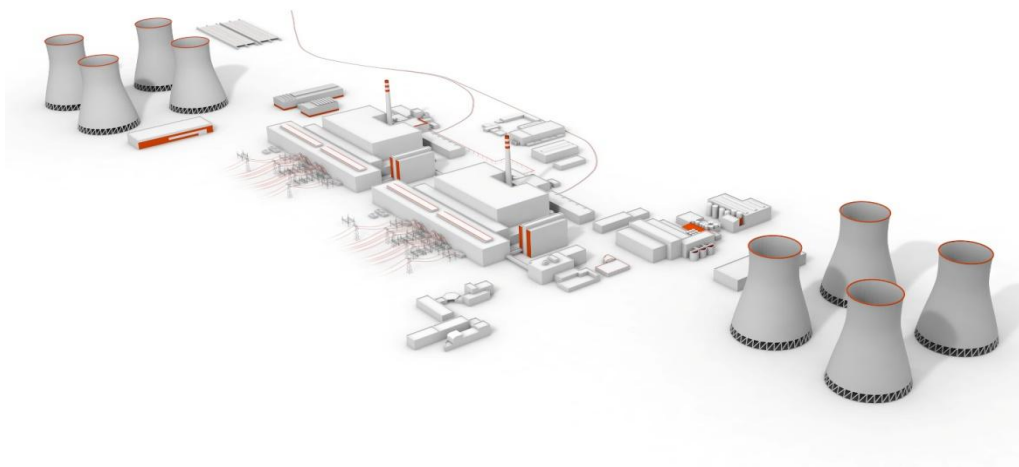
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
ČR	73466	74647	76348	83227	84333	82579	84288	88198	83518	82250	85910	87561	87574	87065	86152
ČEZ	50842	52162	54118	60934	61602	59470	62011	65442	60921	60610	61471	59584	57757	50662	57889
EDU	13588	13593	13299	13755	13632	13744	14025	13907	14448	13955	14176	14369	15022	15680	15371
ETE	2	1 156	5 439	12117	12692	10984	12021	12265	12103	13253	13823	13914	15302	15066	14954
JE	13590	14749	18738	25872	26325	24728	26047	26172	26551	27208	27998	28283	30324	30745	30325
Podíl JE v ČR - %	18,50	19,76	24,54	31,09	31,22	29,94	30,90	29,67	31,79	33,08	32,59	32,30	34,63	35,31	35,20



Obrázek 8 Graf průběhu výroby elektrické energie JE, všech elektráren ČEZ vůči spotřebě elektrické energie ČR[22].

6.1 Jaderná elektrárna Dukovany

30 km od Třebíče se nachází jaderná elektrárna Dukovany. Historie EDU začíná v 70. letech 20. Století, kdy vznikl plán postavit 2 výrobní bloky s výkony 1760 MW. První reaktor byl uveden do provozu v roce 1985, v roce 1986 spuštění 2. a 3. bloku poslední, 4. blok byl spuštěn v roce 1988. Původně měly všechny 4 tlakovodní reaktory typu VVER 440 mít elektrický výkon 440 MW. Nyní však po programu neustálého zvyšování bezpečnosti a program Modernizace, tzv. LTO (long time operation) se využilo projektových rezerv a výkon se zvýšil na 4x510 MW[11].



Obrázek 9 Jaderná elektrárna Dukovany[12].

6.1.1 Jaderný reaktor a palivo

Tlakovodní reaktor VVER 440 typu V-213 je ocelová, hermeticky uzavřená tlaková nádoba, která je přizpůsobená vysokému tlaku chladiva, které je využíváno také jako teplotnosné médium pro přenos energie. Dále je umístěno v reaktorové aktivní zóně poskládáno díky vnitřní vestavěné konstrukci 312 palivových a 37 regulačních tyčí.

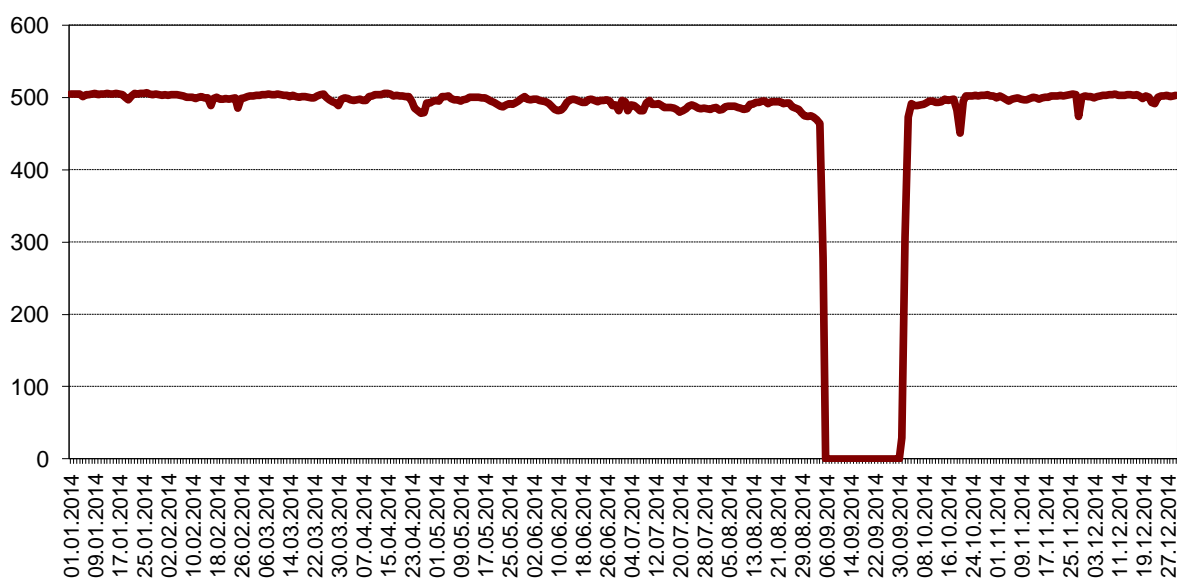
Palivové kazety jsou složeny ze 126 palivových článků. Obal je slitina zirkonia-noibu o průměru 9,1mm a délky 2,4m. Uvnitř článku jsou hermeticky uzavřené palivové keramické peletky tvořeny oxidem uraničitým a obsahují štěpný izotop uranu[14].

V průběhu provozu jaderné elektrárny se využívané palivo se dost měnilo především k využití maximálního výkonu a stále se zdokonaluje. V září minulého roku se naváží do reaktoru nejnovější palivo pod označením Gd-2M+. Toto palivo je obohaceno uranem 235 s hodnotou 4,38%. Tyto peletky oproti minulému typu nemají centrální otvor, až na peletky s gadoliniovým vyhořívajícím absorbátorem. Tloušťka obalu je 25 μ m a peletka je má průměr 7,60 mm. Do budoucna se plánuje využití paliva o velikosti obohacení uranem o hodnotě 4,76%[19].

Regulační kazety tvoří bezpečnostní a regulační prvek k řízení výkonu reaktoru. Jejich tandemové uspořádání složeny z dolní, palivové a horní, absorpční částí kazety. Palivová část je podobná palivové kazetě. Absorpční část je tvořena ocelí s přídavkem bóru, který reguluje štěpnou reakci. Zasouváním regulačních tyčí regulujeme výkon reaktoru. Tyto regulační tyče jsou ovládány motory umístěnými v reaktorovém víku nádoby. Pohon motoru je převodován ozubenými koly na ozubenou tyč, která je napřímo spojena s tyčí umístěnou v kazetě.

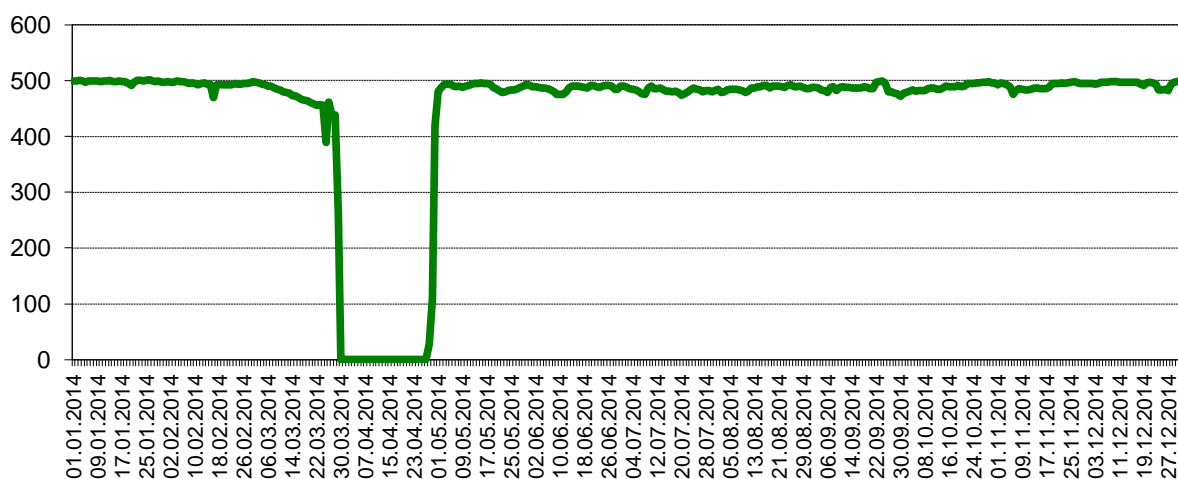
6.1.1.1 Palivový cyklus a proces odstávek

Palivový cyklus používaný v EDU je na pět let, kdy se každý rok postupně každý palivový soubor využije pro rovnoměrné zatížení aktivní zóny. Tento palivový cyklus je pevně dán a odstávka každého bloku reaktoru je vůči sobě vzájemně posunutá.

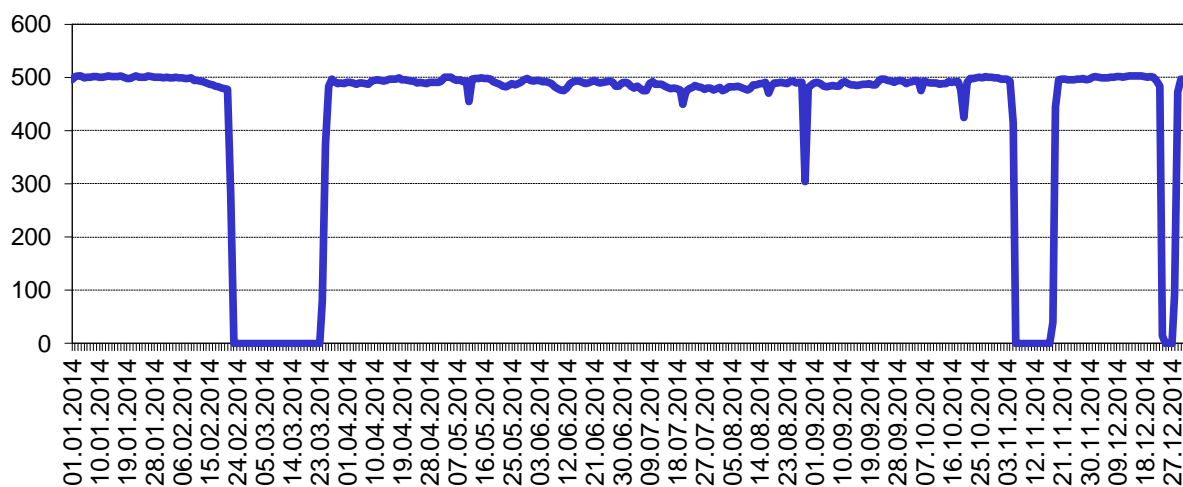


Obrázek 10 Průběh výkonu 1. reaktorového bloku v roce 2014 v jednotkách MWe[22].

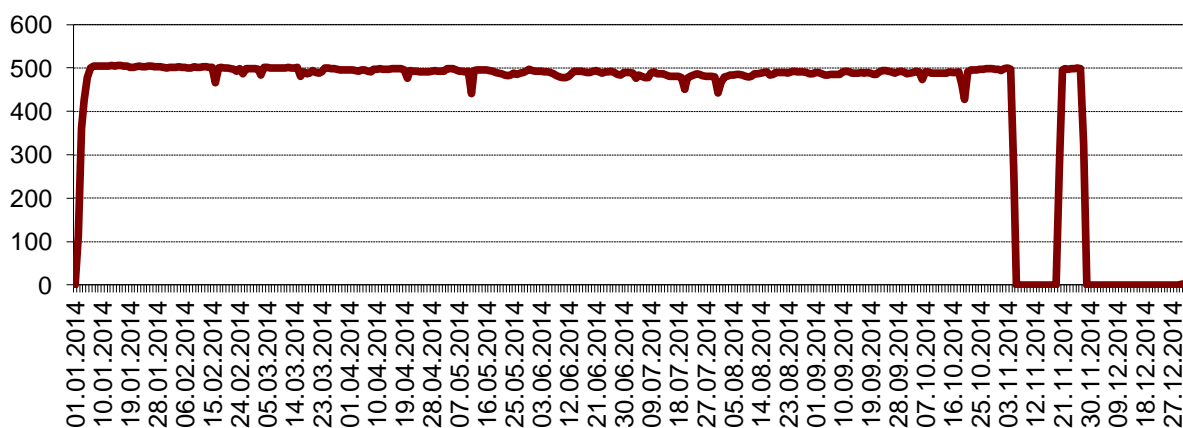
Z obrázku je nejen patrné, jak dlouho trvá plánovaná odstávka, ale i průběh regulace výkonu při podporování podpurných služeb. Využití podpurných služeb je velice časté. Ostatní průběhy dalších tří reaktorových bloku výkonu v závislosti na čase jsou zobrazeny na následujících obrázcích:



Obrázek 11 Průběh výkonu 2. reaktorového bloku v roce 2014 v jednotkách MWe[22].



Obrázek 12 Průběh výkonu 3. reaktorového bloku v roce 2014 v jednotkách MWe[22].



Obrázek 13 Průběh výkonu 4. reaktorového bloku v roce 2014 v jednotkách MWe[22].

Odstávka však nezáleží pouze na výměně paliva, ale i na údržbách a opravách na výrobním bloku elektrárny. Při zvyšování výkonu reaktorového bloku se muselo rekonstruovat a modernizovat mnoho částí, které jsou například: turbína, úpravy ne generátoru, elektrická část výroby a další. Nyní se snaží dosahovat co nejkratší délky odstávky a déle vyrábět energii.

Tabulka 6-2 Vývoj délky odstávek ve dnech[22].

	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
RB1	71,2	34,6	31,1	33,5	57,9	35,2	30,6	30,6	62,7	23,5	23,8	20,9	77,4	30,7	26,0	25,9
RB2	34,4	63,7	39,5	40,2	32,8	55,8	29,5	30,3	32,2	64,6	22,8	21,2	22,3	77,4	32,7	30,0
RB3	34,6	38,7	57,9	36,1	33,7	34,1	70,0	30,6	29,1	21,3	85,2	38,0	34,2	31,1	43,6	29,8
RB4	34,7	37,3	33,0	56,7	30,5	30,9	31,0	44,1	38,8	31,2	63,3	79,4	19,5	39,2	32,7	32,6
EDU	174,9	174,2	161,5	166,5	154,9	155,9	161,1	135,6	162,8	140,6	195,1	159,5	153,4	178,4	135,0	118,3

6.1.2 Elektrická část EDU

Základní rozdělení elektrické části jaderné elektrárny jsou:

- 1) Výroba a vyvedení elektrické energie do ES
- 2) Napájení vlastní spotřeby EDU

6.1.2.1 Výroba elektrické energie EDU

V jaderné elektrárně 4 reaktorové bloky. Každý blok má nainstalován dvě turbosoustrojí, což jsou dvě parní turbíny složené z vysokotlaké a nízkotlaké části, které pohání dva turbogenerátory.

Turbogenerátor, pracující na elektromagnetické indukci transformuje mechanickou energii vytvářenou turbínou na elektrickou. Turbogenerátor má tyto jmenovité hodnoty:

- Zdánlivý výkon 300 MVA;
- Statorové napětí 15,75 kV $\pm 5\%$;
- Statorový proud 10,98 kA;
- Činný výkon 255 MWe (původně měl 220 MWe).

Rotor je buzen stejnosměrným budícím proudem z důvodu vytvoření dvoupólového elektromagnetu. Na stator je pevně připojena spojka k rotoru poháněné turbíny. Stator je tvořen třemi cívkami, které jsou pootočený vzájemně o 120°. Otáčením rotoru, který je nabuzen vzniká indukované napětí na cívkách statoru. Z jedné strany jsou cívky propojeny v jeden uzel, druhá strana je vyvedena na svorky turbogenerátoru.

Tabulka 6-3 Výkonové hodnoty každého bloku Dukovan za rok 2014[22].

Název	Jednotka	RB1	RB2	RB3	RB4	EDU
Výroba elektrické energie	MWh	4 027 208	3 909 022	3 724 265	3 710 107	15 370 602
Dodávka elektrické energie	MWh	3 785 471	3 672 610	3 500 026	3 494 095	14 452 202
Vlastní spotřeba el. energie	MWh	241 737	236 412	224 239	216 012	918 400
Instalovaný výkon	MWe	510,00	510,00	510,00	510,00	2 040,00
Dosažitelný výkon	MWe	500,00	500,00	500,00	500,00	2 000,00
Plánované opravy	MWe	36,68	42,38	41,85	48,36	169,27
Jiné vlivy	MWe	4,01	9,52	7,26	6,36	27,15
Forsír	MWe	1,18	0,05	0,25	0,47	1,95
Regulační zálohy	MWe	0,45	0,07	0,68	0,94	2,14
Vyžádané výpadky	MWe	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OPV	MWe	0,01	1,49	25,24	21,04	47,78
Počet provozních hodin: Re	hod	8 178	8 082	7 742	7 715	
TG 1	hod	8 141	8 026	7 607	7 589	
TG 2	hod	8 134	8 023	7 630	7 580	
Počet náběhů: Re	-	2	2	5	3	
TG 1	-	2	3	4	7	
TG 2	-	1	2	3	5	
Výroba tepla v reaktoru	GJ	42 189 882	41 243 262	39 233 227	39 165 203	161 831 574
z toho: na výrobu el. en.	GJ	42 066 670	41 157 244	39 163 626	39 051 700	161 439 240
na dodávku tepla	GJ	123 212	86 018	69 601	113 503	392 334
Měrná spotřeba JP na výr. el.	GJ/MWh	10,4456	10,5288	10,5158	10,5258	10,5031
Měrná spotřeba JP na dod. el.	GJ/MWh	11,1127	11,2065	11,1895	11,1765	11,1706



Obrázek 14 Turbosoustrojí EDU[15].

Díky projektovým rezervám instalovaný výkon mohl zvýšit až na 255 MWe. Vyvedený proud statoru turbogenerátoru je ze svorek veden v zapouzdřených vodičích do generátorového vypínače. Jeho důležité funkce jsou:

- Přifázování turbogenerátoru k elektrizační síti.
- Při vypnutém stavu lze z turbogenerátoru napájet vlastní spotřebu ze sítě 400 kV
- Při poruše dokáže, vypnou zkratové proudy a bezpečně odpojit turbogenerátor z elektrizační sítě.

Zapouzdřené vodiče vyvedené z generátorového vypínače dále vedou na odbočkový transformátor a blokový transformátor. Z odbočkového transformátoru je odebírána část vyrobené elektrické energie (25 MWe, což je 5-6% výroby), která napájí obvody vlastní spotřeby celé EDU. Blokový transformátor slouží k vyvedení elektrické energie z elektrárny[14].

6.1.2.2 Vyvedení elektrické energie EDU

Blokový transformátor transformuje napětí z 15,75 kV na distribuční hodnotu 400 kV. Vývody z obou transformátorů jsou napájeny oběma turbogenerátory reaktorového bloku. Tyto vývody musí být vzájemně propojeny z důvodu napájení v případě poruchy. Vyvedení do sítě a vzájemné propojení transformátorů je vyřešeno blokově a díky vybavení vývodů odpojovači lze bezproblémově kombinovat spojení. Na vývodech jsou taky nainstalovány kombinované přístrojové transformátory plněný plynem SF₆ z důvodu měření a diagnostiky, dále jsou tam připojené svodiče přepětí z důvodu úderu blesku do vedení.

Rozvodna Slavětice vzdálení 3,5 km od elektrárny, do které je každý samostatný vedení z blokového transformátoru vedeno již distribuční sítí, je vybavena blokovými vypínači začleněnými do systému elektrárny[14].

6.1.2.3 Napájení vlastní spotřeby EDU

Vlastní spotřeba je důležitá pro správný chod elektrárny. V EDU to činí na každý reaktorový blok přibližně 26MWe. Jsou napájeny všechny elektronické stoje a spotřebiče po elektrárně. Speciálně z 1. reaktorového bloku je napájen systém, který dodává elektřinu např. do čerpací stanice na řece Jihlavě nebo chemická úprava vody. Ostatní bloky napájejí vnitřní elektrickou soustavu, do které patří například kanceláře, všechno osvětlení, ale i například hlavní cirkulační čerpadla, jenž jsou umístěna v každé cirkulační smyčce, každé o příkonu 2MWe[14].

6.2 Jaderná elektrárna Temelín

Nachází se 24 km od Českých Budějovic v roce 1980. Vznikl záměr postavit 4 výrobní bloky o celkovém výkonu 4000 MWe. Po roce 1993 se z tohoto plánu sešlo a nakonec se vybudovaly bloky 2. Elektrickou energii zde vyrábí dva výrobní bloky s tlakovodními reaktory VVER 1000 typu V 320. První elektrickou energii začal Temelín do sítě dodávat v prosinci roku 2000. Nyní elektrárna pracuje na výkonu 1x 1078MWe +1x 1055MWe. Podíl výroby na spotřebu v ČR se pohybuje okolo 17%. Temelín oproti Dukovanům má kontejment.



Obrázek 15 Jaderná elektrárna Temelín[13]

6.2.1 Výroba a vyvedení elektrické energie

Princip výroby se oproti EDU neliší. Dva reaktory, každý pohání 4 parogenerátory. V sekundárním okruhu pára z parogenerátoru pohání turbínu složenou z jednoho vysokotlakého dílu a třech nízkotlakých dílů. Turbína a spojená pevnou spojkou s turbogenerátorem, který má tyto jmenovité hodnoty:

- Zdánlivý výkon 1 111 MVA
- Statorové napětí 24 kV
- Statorový proud 26,73 kA
- Činný výkon 912 MWe

Turbogenerátor je chlazený vodou a vodíkem. Vyvedení výkonu je na podobném principu jako v EDU. Vlastní spotřeba jaderné elektrárny činí 69 MWe[13].

Tabulka 6-4 Výkonové hodnoty každého bloku Temelínu za rok 2014[22].

Název	Jednotka	RB1 - 2014	RB2 - 2014	ETE - 2014
Výroba elektrické energie	MWh	7 580 987	7 372 809	14 953 796
Dodávka elektrické energie	MWh	7 193 898	6 989 151	14 183 049
Vlastní spotřeba elektrické energie	%	5,11	5,20	5,15
Instalovaný výkon	MWe	1 125,00	1 125,00	2 250
Dosažitelný výkon	MWe	1 063,02	1 056,00	2 119
Plánované opravy	MWe	186,05	142,88	328,93
Vynucené odstávky	MWe	0,80	0,01	0,81
Jiné vlivy	MWe	0,05	0,06	0,11
Teplárství	MWe	0,00	0,01	0,01
Forsír	MWe	6,34	4,72	11,06
Regulační zálohy	MWe	0,13	0,46	0,59

Vyžádané výpadky	MWe	16,90	57,46	74,36
OPV	MWe	16,92	75,66	92,58
Load Factor	%	81,41	79,70	80,56
Počet provozních hodin reaktoru	Hod	7 197	7 148	14 345
Počet provozních hodin TG	Hod	7 093	6 980	14 073
Počet náběhů reaktoru	-	2	4	6
Počet náběhů TG	-	2	4	6
Výroba tepla v reaktoru	GJ	79 634 658	78 080 078	157 714 736
z toho: na výrobu elektrické energie	GJ	79 312 518	77 914 410	157 226 928
na dodávku tepla	GJ	322 140	165 668	487 808
Měrná spotřeba JP na výrobu elektřiny	GJ/MWh	10,4620	10,5678	10,5142
Měrná spotřeba JP na dodávku elektřiny	GJ/MWh	11,0250	11,1479	11,0856

7 REGULACE VÝKONU

Z důvodu neskladnosti elektrické energie je potřeba regulovat při nejmenších ztrátách výrobní elektrárenské bloky. I jaderné elektrárny musí regulovat vlastní výkon dodávaný do elektrizační soustavy. Z hlediska rozsahu dlouhodobé bilance lze definovat základní rovnici pro rovnováhu v propojené elektrizační síti:

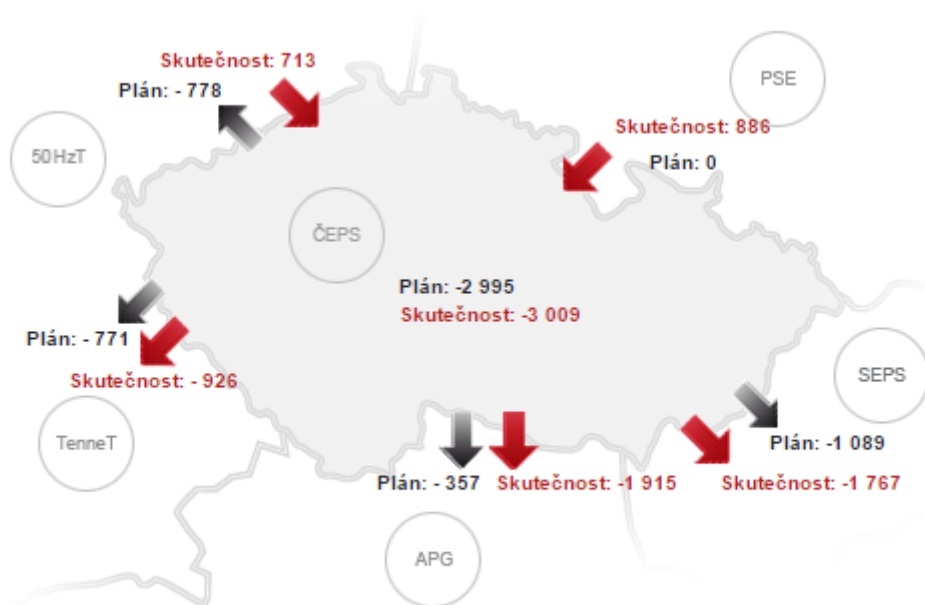
$$\sum P_G = \sum P_S + \sum P_Z \quad (\text{W, W, W}) \quad (7.1.)$$

$\sum P_G$ suma činného výkonu dodávaný generátory,

$\sum P_S$ suma činného zatížení ES s vlastní spotřebou elektráren,

$\sum P_Z$ celkové ztráty v sítích.

Pro rovnováhu a stabilitu distribuční soustavy byl vytvořen burzovní trh, kde se obchoduje se silovou elektrickou energií. Cena energie je nestálá a poptávky či nabídky rovněž. Vždy záleží, zda je energie dostatek, pak je cena energie levná a výhodné ji odkoupit. Může existovat i opačný stav, že energie je málo a cena roste nahoru podle počtu nabízených dodavatelů. Rovněž je i nesmlouvan plán kolik poteče energie k ostatním sousedícím státům a jejím distributorům. Zde je pro ukázkou rozdíl mezi plánovaným a skutečným tokem energie skrz příhraničí ze dne 18. 1. 2015 v rozsahu 16:00-16:59 :



Obrázek 16 Příhraniční toky elektrické energie[5].

Výroba se také nemusí vždy omezovat. Existují i prostředky, které nabízejí využít energii za pomoci cenově výhodnějších tarifů. Tyto tarify jsou nastaveny časově, kdy zákazník má smluvně ujednán harmonogram, v těchto intervalech zákazník odebírá energii za mnohem výhodnějších podmínek. Technicky tento prostředek je zhotoven díky signálu HDO, který se distribučně se posílá a přepíná v elektroměru měřicí soustavu z vysokého tarifu na nízký tarif[16].

7.1 Regulační systém bloku v JE Dukovany

Tento systém je možné dělit do dvou skupin, kdy jedna skupina se snaží pouze regulovat výkon bloku a udržení regulované hodnoty. Druhá skupina se zase snaží přizpůsobit první skupině potřebné podmínky pro možnost regulovat výkon bloku

7.1.1 Regulace výkonu bloku

Tato skupina reguluje výkon v hlavní ose výroby. Může se však regulovat ve dvou směrech, kterými jsou:

- Od reaktoru k turbíně

V tomto případě se reguluje výkon reaktoru a tomuto výkonu se přizpůsobuje turbína, kterou pomocí ostatních regulátorů regulují vstupní parametry páry do turbíny.

- Od turbíny k reaktoru

Regulací výstupu, v tomto případě turbíny, regulujeme a poté na základě parametrů změny výkonu reaktoru se reguluje jeho výkon dle určitého regulačního programu.

Dle základních parametrů, potřebných regulací a potřebám výroby se nastavuje regulační program. Ten pak realizuje regulaci řízení k docílení určitých parametrů.

Tento regulační režim se používá v EDU. Při normálním stavu se výkon reguluje principem od turbíny k reaktoru. Turbína nastaví potřebný regulovaný výkon a reaktor se díky zvolenému regulačnímu programu zreguluje. Při nenormálním stavu se musí prvotně určit, z jakého důvodu je způsoben nenormální stav. Pokud tento nenormální stav narušuje aktivní zónu, je prvotním základem regulovat výkon reaktoru. V jiných případech se upřednostňuje opět regulace od turbíny k reaktoru. Proto tímto způsobem musí být pokryty oba dva způsoby regulace. Primárním parametrem, podle kterého se odvozuje veškerá regulace je zvolen tlak páry v hlavním parním kolektoru p_{HPK} . Od tohoto parametru se odvíjí regulační program. Buďto regulují výkon a druhým regulátorem regulují změny působící na turbínu nebo regulují tlak v hlavním parním kolektoru. Regulátorem v reaktoru jsou regulační kazety. Regulátorem v turbíně jsou regulační ventily na vstupu do turbíny. Jelikož jsou ale regulátory navrženy individuálně, pro správný chod všech regulací jsou do regulace vloženy další regulační prvky[14].

Pro primární stranu je regulace doplněna limitačním systémem pro zregulování výkonu, který má předem určený poruchové stavy. Na sekundární straně je regulace zabezpečena přepouštěcí stanicí přímo do kondenzátoru, kdy přebytky páry z hlavního parního kolektoru se přepustí mimo turbínu přímo do kondenzátoru[22].

7.1.2 Ostatní regulační systémy podporující regulaci výkonu

Tyto regulační systémy slouží k udržení nominálních hodnot v technologickém obvodu při prováděné regulaci. Pro vytvoření těchto regulátorů jsou nejčastěji složený ze stavebnicových regulačních obvodů, které jsou nejjednodušší pro nastavení. Vždy regulují potřebný parametr a při poruše lze jednoduše vyměnit tento modul. Po nejnovějších modernizacích se používají tyto regulační systémy[14]:

- Řídicí systém regulace primárního bloku (ŘSBP)
Jsou to regulační obvody a okruhy pro regulaci tlaku páry v hlavním napájecím kolektoru;
- Řídicí systém regulace sekundárního bloku (ŘSBS)
Regulační obvody regulující parametry sekundární stany mimo turbosoustrojí;
- Řídicí systém regulace turbosoustrojí (ŘSBT)
Obvod zabezpečující správný chod turbosoustrojí;
- Řídicí a regulační systém bloku blokové (nouzové) dozorný (ŘSBB(N))
Signalizace a ovládání z řídicího centra
- Systém diagnostiky a informatiky (DIAG)
Tento systém je nadřazený před předešlými systémy, kdy výstup z tohoto systému je zaveden do blokového informačního systému

7.2 Regulace výkonu JE Dukovany

Bloky jaderné elektrárny Dukovany podporují tyto podpůrné služby[22]:

1. Dle nutnosti primární regulaci (PR);
2. Sekundární regulaci (SR);
3. Terciální regulaci (TR);
4. Minutová záloha (MZ);
5. Sekundární regulaci napětí a jalového výkonu (SRUQ nebo ASRU);

6. Snížení výkonu (SV30).
7. Ostrovní provoz (OP);
8. Diagram výkonu (DG);
9. Skupinový rozdělovač výkonu (SRV).

Tabulka 7-1 Typy poskytovaných podpůrných služeb o dané hodnoty[22].

Služby	Schopnost poskytovat	Recertifikováno	Parametry recertifikace	Parametry nabízené přípravou provozu
PR	ANO	NE	-	-
SR	ANO	ANO	PSR = +/- 40 MWe Pmin = 425-385 MWe Pmax = 505-465 MWe cmaxSR = 4,4 MWe/min	PSR= +/- 10÷15 MWe PSRM= -10÷-30 MWe PSRP= 10÷20 MWe Pmin= 475-435 MWe Pmax=505-465MWe cmaxSR = 4,4 MWe/min
MZ15P	ANO	ANO	PMZ15P = 66 MWe Pmin = 439-399MWe Pmax = 505-465MWe cmaxMZ15P=4,4MWe/min	PMZ15P= 10÷20 MWe Pmin = 485-445 MWe Pmax=505-465MWe cmaxMZ15P = 4,4 MWe/min
MZ15M	ANO	ANO	PMZ15M = -66 MWe Pmin = 439-399 MWe Pmax = 505-465 MWe cmaxMZ15M=4,4MWe/min	PMZ15M= -10÷-66 MWe Pmin= 439-399 MWe Pmax=505-465MWe cmaxMZ15M = 4,4 MWe/min
MZ15P - telefon	ANO	Necertifikuje se	-	PMZ15P = 10÷20 MWe Pmin = 480 MWe Pmax = 500 MWe cmaxMZ15P = 5 MWe/min
MZ15M - telefon	ANO	Necertifikuje se	-	PMZ15M= -10÷-40 MWe Pmin= 460 MWe Pmax = 500 MWe cmaxMZ15M = 5 MWe/min
SV ₃₀ , MSV, Redisp.	ANO	Necertifikuje se	-	Pxxx= -90 MWe Pmin= 410 MWe Pmax= 500 MWe cmaxxxx = 5 MWe/min
ASRU	ANO	ANO	Q _{XN} = 146 MVar Q _{MM} = -72 MVar Q _{XM} = 167 MVar Q _{MN} = -43 MVar Pmin = 127 MWe Pnom = 255 MWe	Q _{XN} = 146 MVar Q _{MM} = -72 MVar Q _{XM} = 167 MVar Q _{MN} = -43 MVar P _{min} = 127 MWe P _{nom} = 255 MWe

OP	ANO	ANO	$P_{\min\text{ROP}} = 44 \text{ MWe}$ $P_{\max\text{ROP}} = 498 \text{ MWe}$ $P_{\min} = 249 \text{ MWe}$ $P_{\text{nom}} = 498 \text{ MWe}$	$P_{\min\text{ROP}} = 44 \text{ MWe}$ $P_{\max\text{ROP}} = 498 \text{ MWe}$ $P_{\min} = 249 \text{ MWe}$ $P_{\text{nom}} = 498 \text{ MWe}$
DG	ANO	Necertifikuje se	-	-
SRV	ANO	Necertifikuje se	-	$\text{PSRV} = -30 \text{ MWe}$ $P_{\min} = 475\text{-}435 \text{ MWe}$ $P_{\max} = 505\text{-}465 \text{ MWe}$ $c_{\max\text{SRV}} = 4,4 \text{ MWe/min}$

Certifikování podpůrných služeb se musí kontrolovat, především jejich kvalita a rychlost náběhu na danou hodnotu výkonu. Doba, za kterou je potřeba obnovit certifikaci na danou podpůrnou službu je zobrazena na obrázku 17 a je daná Kodexem podpůrných služeb.

Tabulka 7-2 Doba recertifikací podpůrných služeb[22].

PpS	Časový interval certifikace
PR, SR, MZt, ASRU	4 roky
OP, BS	5 let

Podpůrné služby mají při dnešním použití na EDU také své limity, které se nesmí přesáhnout. Hodnoty, kolikrát se maximálně můžou dané regulace použít, jsou sepsány v tabulce 7-3.

Tabulka 7-3 Maximální opakování regulace činného výkonu v jednom roku palivové kampaně platné pro jeden reaktorový blok, což znamená pro dvě turbosoustrojí[22].

změna výkonu do (MWe/blok)	trend změny výkonu (MWe/min)	počet cyklů v kampani 1. až 4. RB
-25	5	bez omezení
-45	5	350*
-90	5	150*
-120	2,5	25
-250	2,5	15
-250 - odstavení jednoho TG	2,5	10

Hodnoty s hvězdičkou označují, kolikrát se mohou regulovat všechny typy podpůrných služeb, které zasahují do této hladiny regulovaného výkonu.

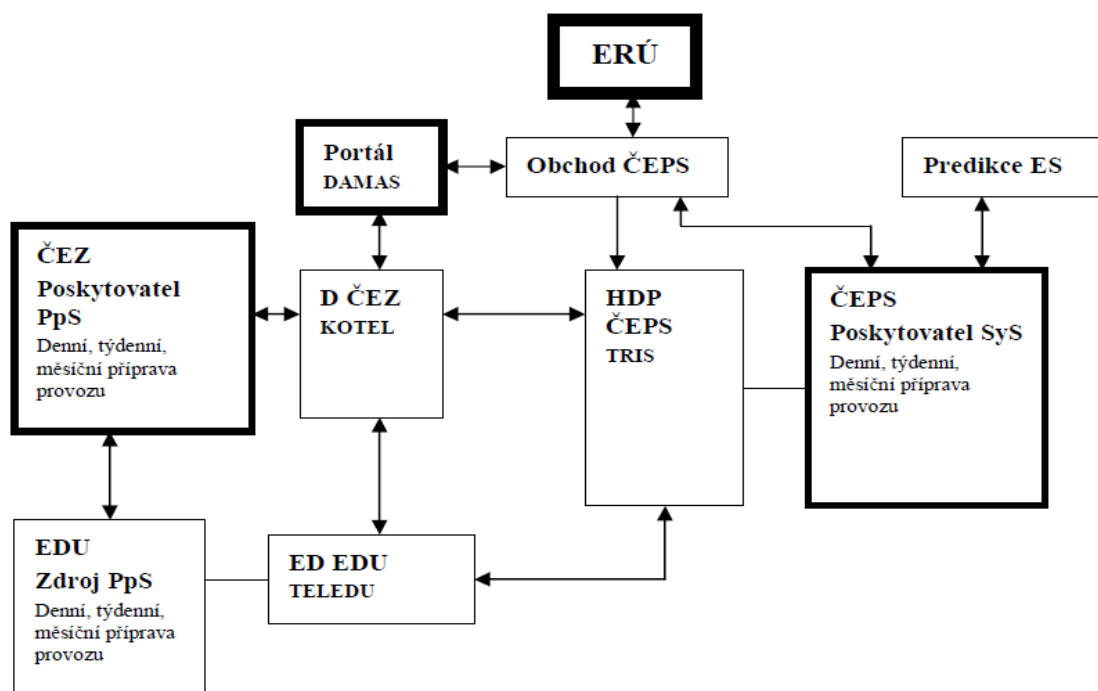
Dále je také důležitá délka provozu reaktorového bloku v závislosti na hodnotě snížení činného výkonu, na délce již provozovaného paliva v reaktoru a především na koncentraci kyseliny borité. V případě, že by hodnota kyseliny borité klesla pod hodnotu $C_B = 0,1 \text{ g/kg}$, s reaktorem by bylo obtížnější manévrovat, z důvodu nízké manévrovací schopnosti.

Tabulka 7-4 Možná délka provozu reaktorového bloku v závislosti na velikosti regulované hodnoty výkonu a koncentraci kyseliny borité označená C_B [22].

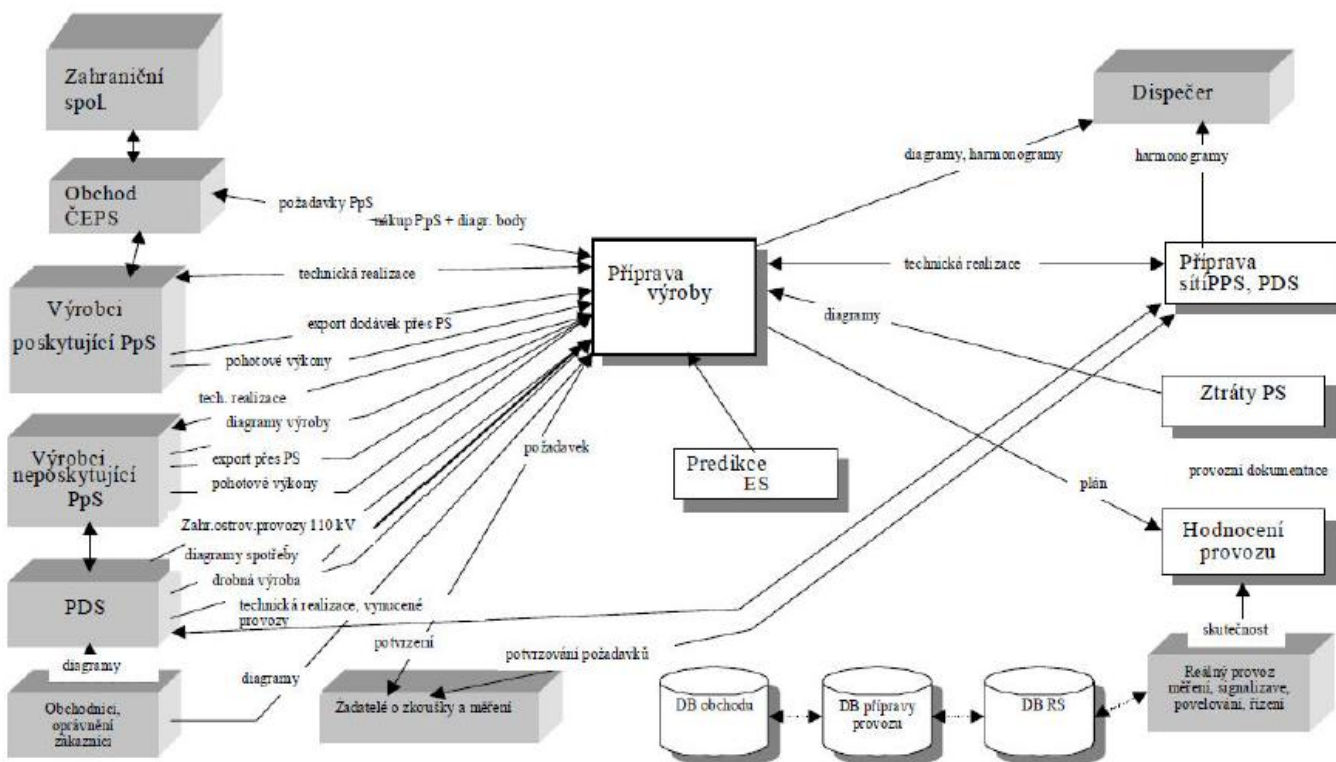
maximální možnosti regulace [MWe/blok]	0 MWe	-250 MWe	-120 MWe	-90 MWe
trend změny výkonu [% N_{nom} /min] tj. [MWe/min]	0	0,5[%/min] tj. 2,5[MWe/min]	0,5[%/min] tj. 2,5[MWe/min]	1,0[%/min] tj. 5,0[MWe/min]
Délka provozu bloku v efektivních dnech	0 ÷ 7	7 ÷ T_{ef} pro $c_B \geq 2,5$ g/kg	7 ÷ T_{ef} pro $c_B \geq 0,3$ g/kg	7 ÷ T_{ef} pro $c_B \geq 0,1$ g/kg

7.2.1 Plánování a obchod s podpurnými službami

Na kontrolu s obchodování s elektrickou energií a celkově cenu elektrické energie určuje a kontroluje Energetický regulační úřad. Od toho se pak dovíjí cena a obchod z energií a využívání podpurných služeb v případě záporné ceny. Na základě ceny provozovatel ČEZ využívá zápornou cenu elektrické energie, kterou odkoupí a poté zreguluje energetický blok, který poskytne podpurné služby, za které je sám placený. Dále i Dispečink ČEPS nařizuje, na jak dlouho a o kolik musí zregulovat elektrárenský blok. Celková struktura je zobrazena na obrázku.



Obrázek 17 Struktura komunikace na trhu a regulaci elektrické energie[22].



Obrázek 18 Informační toky při plánování provozu[22].

Podpůrné služby nemusejí být okamžitě rozhodnuty, ale mohou být i dopředu plánovány. Toto plánování může být ovlivněno odstavením významných zdrojů, plánované odstávky nebo plánované zatížení. Denní plány musí být oznámeny minimálně den předem. Dále je potřeba splnit určité podmínky. Celkový postup je vyobrazen na obrázku 19.

7.2.2 Primární regulace výkonu

Primární regulace výkonu je schopná poskytovat, avšak není certifikována z důvodu nízkého využívání. V případě odchylky frekvence sítě je schopnost dodání regulované hodnoty činného výkonu do 30 sekund od zadání požadavku. Minimální hodnota regulace bloku je 3 MWe. Maximální hodnota dosahuje 10MWe. Tato služba je podporovaná i v režimu dálkového ovládání.

7.2.3 Sekundární regulace výkonu a frekvence

Kvalita poskytované služby se určuje podle rychlosti najetí na požadovaný výkon. Do deseti minut je potřeba dosáhnout potřebnou definovanou hodnotu z ČEPS. Symetrická regulace může regulovat všechny reaktorové bloky současně. Asymetrická regulace reguluje pouze „schopné“ reaktorové bloky. Další charakteristiky této regulace jsou vloženy v tabulce 7-1. Tato služba je poskytovaná i v režimu dálkového ovládání.

7.2.4 Minutová záloha

Tato služba se dělí na dobu, za kterou je možno dosáhnout regulovaného výkonu, ale především, zda je potřebné zvýšit regulovaný výkon (MZtP), či snížit (MZtM). Časy, za které lze dosáhnout určitého výkonu, se dělí na 5, 15 či 30 minut od zadání požadavku. Doba aktivace této

regulace pro MZ15 a MZ30 není nijak omezena. U MZ5 je však garantovaná hodnota regulační zálohy 4 hodiny. Další podrobnosti jsou v tabulce 7-1. Tato služba je poskytována v režimech na telefon a dálkového ovládání.

7.2.5 Sekundární regulace napětí a jalového výkonu

Tato regulace se provádí automaticky (ASRU), kdy je certifikovaná hodnota upravena buzením generátoru. Rozsah buzení se pohybuje okolo 2 kV. Tato změna vytvoří odezvu o 100 MVar jalového výkonu. Tato změna je omezena na 2 minuty a v závislosti na oteplení vinutí buzení, oteplení rotoru a statoru generátoru a celkovou stabilitou turbosoustrojí. ASRU dále spolupracuje s terciální regulací U a Q. Parametry garantovaných hodnot jsou v tabulce 7-1. Tato služba je poskytována i v režimu na telefon.

7.2.6 Snížení výkonu

Snížení výkonu, který má být dosažený do 30 minut, nahrazuje terciální regulaci činného výkonu po vyčerpání sekundární regulace činného výkonu. Hodnotu požadované regulace určí dispečink ČEZu. Tato služba se poskytuje v případě nedostatku potřebné regulace již ze sekundární regulace a MZ15. Tato služba je garantovaná na 24 hodin. Minimální regulace výkonu je 30 MWe. Další hodnoty jsou v tabulce 7-11. Služba je aktivovaná v režimu na telefon.

7.2.7 Plnění diagramového výkonu

Jedná se o základní službu, která zahrnuje smluvní sjednání o dodávce silové energie spotřebitelům. Bez aktivace této služby nelze aktivovat sekundární regulaci, minutovou kladno a zápornou zálohu a skupinové rozdělení výkonu. Tyto služby jsou podporovány za pomoci systému KOTEL. Služba je poskytována v režimu dálkového ovládání.

7.2.8 Schopnost výroby do ostrovního provozu

V případě vychýlení frekvence sítě či odpojení sítě od EDU (možnost Blackoutu) bude EDU schopná vytvořit ostrovní síť. Automaticky dojde k zregulování výkonu a bez přívodu energie dokáže i v případě výpadku najet na výrobní hodnotu. Tato služba (start ze tmy) je v případě blackoutu spojená s přečerpávací vodní elektrárnou Dalešice. Vytvoření ostrovní sítě pak může postupně připojovat další obvody k dosažení nominálních parametrů v okolní síti. Strestesty však prokázali schopnost samostatného rozběhem EDU díky záložních zdrojů, které jsou diesel generátory a baterie. Tato služba může být aktivovaná v režimu na telefon.

7.2.9 Skupinový rozdělovač výkonu

V závislosti s řídicím systémem KOTEL a dispečinkem ČEZu zajišťuje téměř symetrické rozdělení výkonu mezi elektrárenskými bloky z důvodu stability a rovnováhy výroby a spotřeby elektrické energie. Zkušenost dispečinku ČEZu pak přes KOTEL určí odchylku a poté zreguluje či vykompenzuje odchylku pomocí služby SRV.

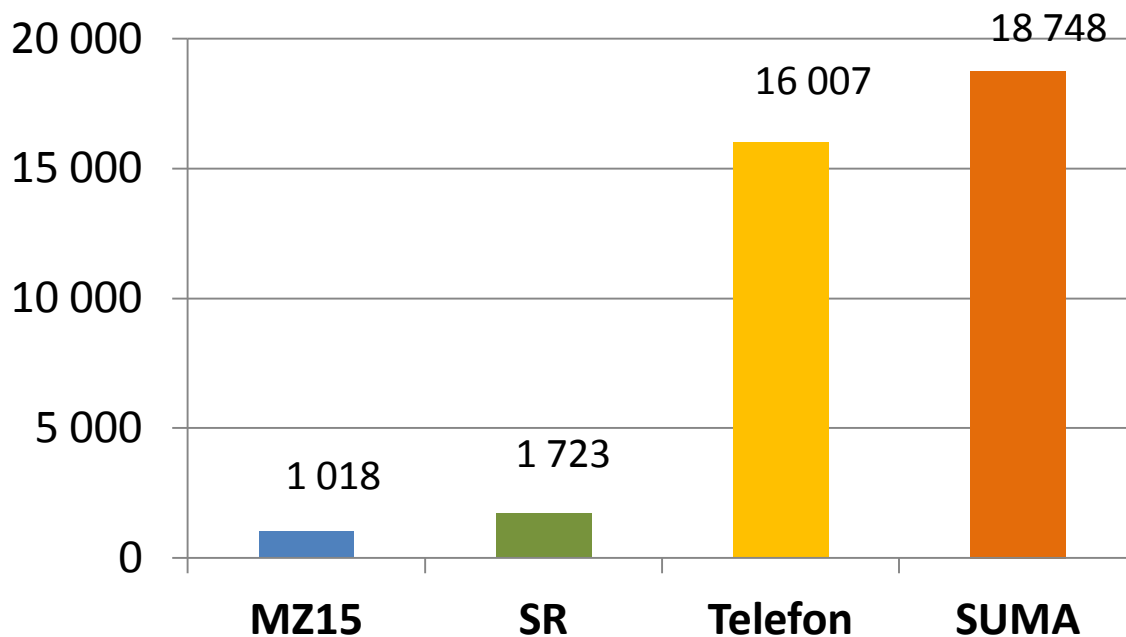
7.2.10 Redispečink

Služba používaná především pro zabezpečení přenosové soustavy, kdy možné přetoky příhraniční nebo vnitrostátní, zreguluje reaktorový blok na hodnotu, která je určena dle dispečinku ČEPSu. Tím se odlehčí síť, využijí se přetoky a utlumí se jejich velikost. Tato služba je poskytována i na telefon.

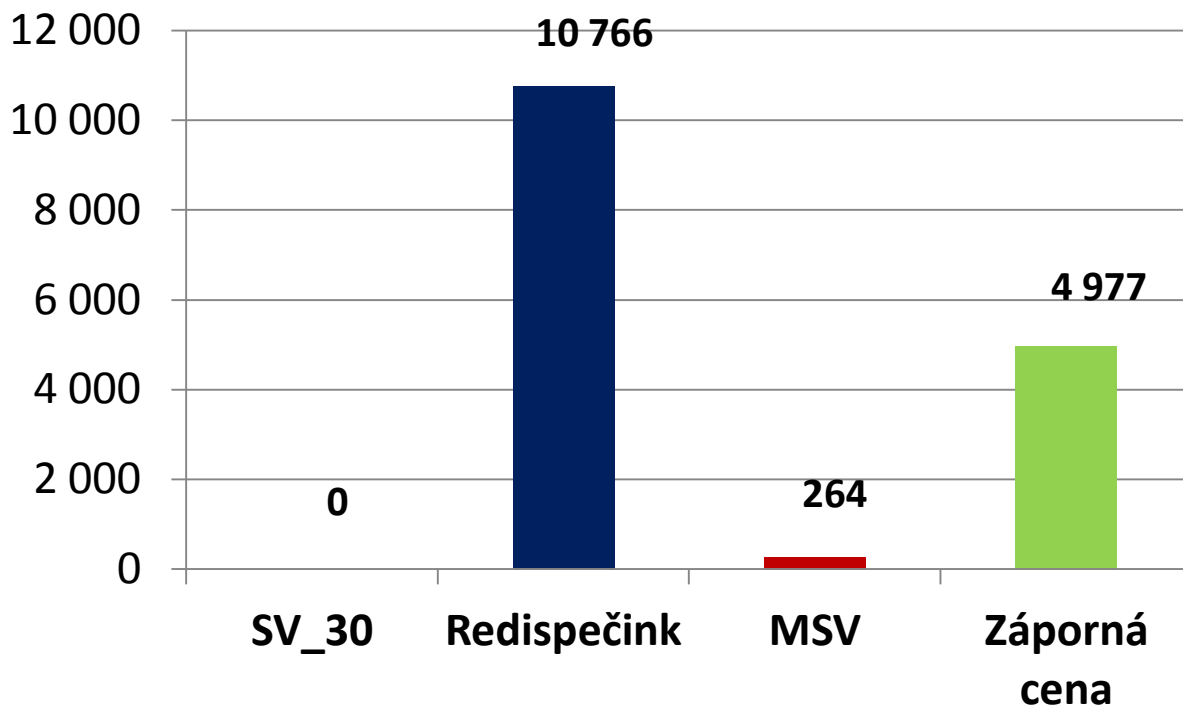
7.2.11 Regulace výkonu na vlastní spotřebu

V okamžiku, kdy frekvence sítě přeroste nad maximální frekvenci, která je 52,5 Hz po dobu deseti sekund, nebo minimální frekvenci 47,9 Hz po dobu jedné sekundy, je povinen elektrárenský blok se odpojit od sítě a zregulovat svůj výkon na svojí vlastní spotřebě. Po dobu minimálně dvou hodin musí udržet regulovanou hodnotu, která činí pro každý blok EDU 26 MWe. Toto rozhodnutí je dle kodexu chodu elektrárenských bloků učinit každý elektrárenský blok. V EDU to probíhá tak, že se odpojí linky vyvedení výkonu 400kV v rozvodně Slavětice. Poté elektrárna přechází do ostrovního režimu, postupně automatika uzavírá regulační klapky a ventily na turbosoustrojích, čímž se sníží průtok páry turbínou a zredukuje se otáčky na nominální hodnotu, která činí 3000 otáček za minutu. Vnitřní struktura propojení vytvoří obvod pro napájení potřebných spotřebičů pro správný chod elektrárny. Zregulovat na vlastní spotřebu je pro všechny bloky možné, ale všechny bloky musí být v provozu z důvodu aktivní zálohy. Tento postup lze učinit automaticky nebo pomocí ručního ovládání. Při regulaci se sníží výkon regulace až na 20% ze své nominální hodnoty výkonu. Po zregulování přejde regulace do ručního režimu. Dále pokud je zapnutý ruční režim regulace a výkon reaktoru je nad polovinou své nominální hodnoty, regulace dále probíhá ručně. Pokud však výkon reaktoru klesne pod polovinu své nominální hodnoty v ručním režimu, automaticky se reaktor zreguluje na hodnotu 20% nominálního výkonu.

Tato regulace byla úspěšně odzkoušena, přechod výkonu na vlastní spotřebu probíhal za minimálního zpoždění a po dobu, na jak dlouho je potřeba. V případě, kdy není potřeba zregulovat některý z bloků, reaktorový blok je připojen na rezervní přípojnicí 6,3 kV, pokud je teda funkční, v jiném případě je potřeba reaktor přepnout do havarijního odstavení, po kterém je opětovný provoz schopen po 8 až 16 hodinách[22].



Obrázek 19 Graf rozdělení regulačních záloh EDU za rok 2014 v MWh[22].



Obrázek 20 Graf rozdělení regulace EDU na telefon v roce 2014[22].

Tabulka 7-5 Typy regulací na každém bloku EDU[22].

Bloky EDU	Typ regulace	Počet hodin	Celkem MWh
RB1	MZ15	14	254
	SR	54	712
	Telefon	96	2 962
RB2	MZ15	0	0
	SR	0	0
	Telefon	8	614
RB3	MZ15	58	449
	SR	38	447
	Telefon	110	5074
RB4	MZ15	54	315
	SR	40	564
	Telefon	144	7 358

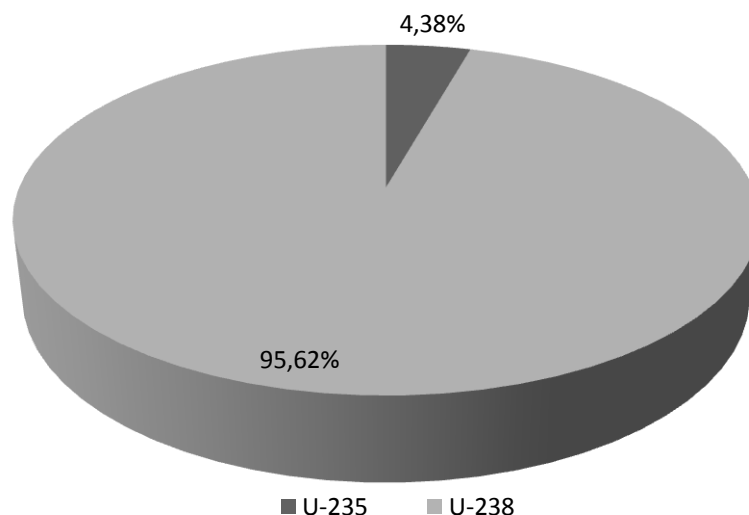
7.2.11.1 Výpočty vyhoření paliva při regulaci výkonu reaktoru

Pro výpočet byl použit program $U_w B_1$ [23], díky kterému byl zhotoven výpočet vyhoření paliva při normálním provozu, při regulaci o maximální možnou hodnotu 250 MWe a fiktivní výpočet pro dlouhodobou regulaci na vlastní výrobu JE.

Nominální tepelný výkon reaktoru EDU činí 1444 MWt. Množství paliva v reaktoru je 42 tun. Výstupní velikost výkonu z generátoru je 510 MWe. Měrný výkon reaktoru je vypočítán:

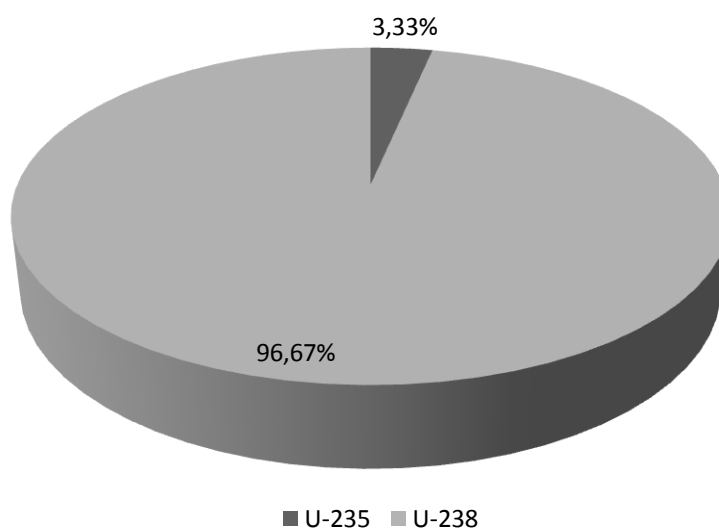
$$p_t = \frac{P_t}{m_p} = \frac{1444}{42} = 34,4 \frac{MWt}{t}. \quad (7.2)$$

Zadáme vstupní parametry, které jsou dále například parametry paliva, obohacení. Dosavadní čerstvé palivo je obohaceno na hodnotu 4,38%. Efektivní délka palivového cyklu je 330 dní a počet výpočtových cyklů byl zvolen jeden. Pro výpočet byl zvolen rozdíl vyhoření paliva během jednoho roku.



Obrázek 21 Graf procentuelního složení obohacným štěpným materiálem před zavezením do reaktoru.

Po zavezení paliva do reaktoru a provozu reaktoru při nominálním výkonu obohacené palivo částečně vyhoří. Velikost vyhoření paliva je patrná na obrázku 22.



Obrázek 22 Graf procentuelního hodnota štěpného izotopu v palivu při nominálním výkonu.

Výpočet vyhoření paliva v reaktoru, uvažovaný pro zjednodušení regulaci po celou dobu provozu reaktoru je potřeba změnit měrný výkon reaktoru. Výkon reaktorového bloku nyní

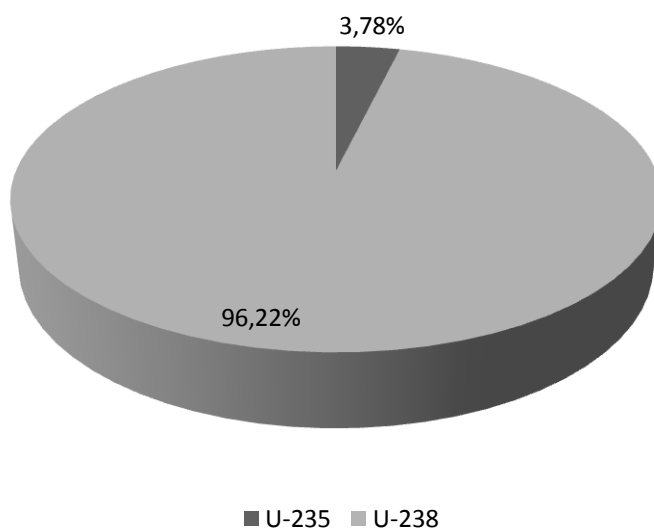
snížíme o 250MWe. Prvně je potřeba vypočítat tepelný výkon reaktoru při regulaci. Ten se vypočítá:

$$P_{t-250MW} = \frac{P_t}{P_e} * P_{e\ reg} = \frac{1440}{510} * 260 = 734,12\ MWt \quad (7.3)$$

Dále si vypočítáme měrný výkon reaktoru:

$$p_t = \frac{P_t}{m_p} = \frac{734,15}{42} = 17,48\ \frac{MWt}{t}. \quad (7.4)$$

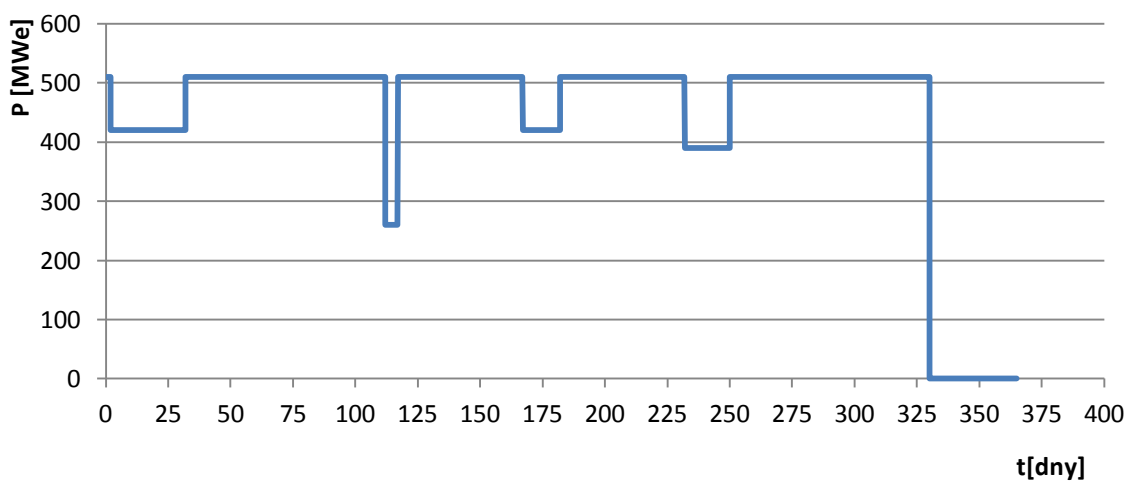
Do reaktoru zavezeme stejné palivo jako při nominálním provozu. Procentuelní vyhoření paliva po prvním roce se změní na hodnotu viditelnou na obrázku 23.



Obrázek 23 Graf procentuelního obohacení štěpným izotopem v palivu reaktoru po prvním roce na regulované hodnotě výkonu 260MW.

Procentuelní vyhoření paliva oproti nominálnímu provozu se změní o 0,45%.

Nyní byl vytvořen uměle průběh větších regulací z podporovaných podpůrných služeb. Průběh lze vidět na obrázku 24. Efektivní doba provozu reaktoru je obvyklých 330 dnů.



Obrázek 24 Průběh uměle vytvořeného výkonu reaktoru, který by uvažoval delší využití podpůrných služeb.

Pro tento průběh bylo potřeba vypočítat měrnou spotřebu výkonu z paliva pro regulace -90 MWe, -120 MWe a -250 MWe. Výpočet vypadal takto:

$$P_{t-250MW} = \frac{P_t}{P_e} * P_{e\ reg} = \frac{1440}{510} * 260 = 734,12\ MWt \quad (7.5)$$

$$P_{t-120MW} = \frac{P_t}{P_e} * P_{e\ reg} = \frac{1440}{510} * 390 = 1101,176\ MWt \quad (7.6)$$

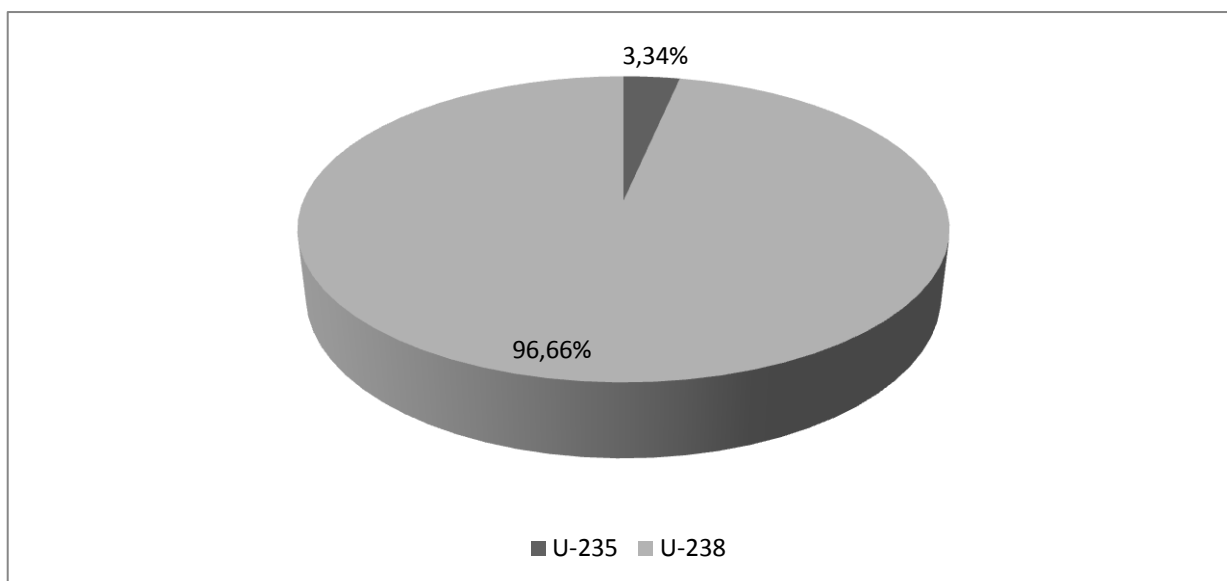
$$P_{t-90MW} = \frac{P_t}{P_e} * P_{e\ reg} = \frac{1440}{510} * 420 = 1185,882\ MWt \quad (7.7)$$

$$p_{t-250} = \frac{P_t}{m_p} = \frac{734,15}{42} = 17,48\ \frac{MWt}{t}. \quad (7.8)$$

$$p_{t-120} = \frac{P_t}{m_p} = \frac{1101,176}{42} = 26,22\ \frac{MWt}{t}. \quad (7.9)$$

$$p_{t-90} = \frac{P_t}{m_p} = \frac{1185,88}{42} = 28,23\ \frac{MWt}{t}. \quad (7.10)$$

Tyto hodnoty byly vloženy do výpočtového programu. Po jednom roku provozu v reaktoru štěpný materiál vyhořel na hodnotu 3,34%, jak je patrné z obrázku 25.



Obrázek 25 Procentuelní složení paliva se štěpným izotopem po regulovaném provozu jednoho roku.

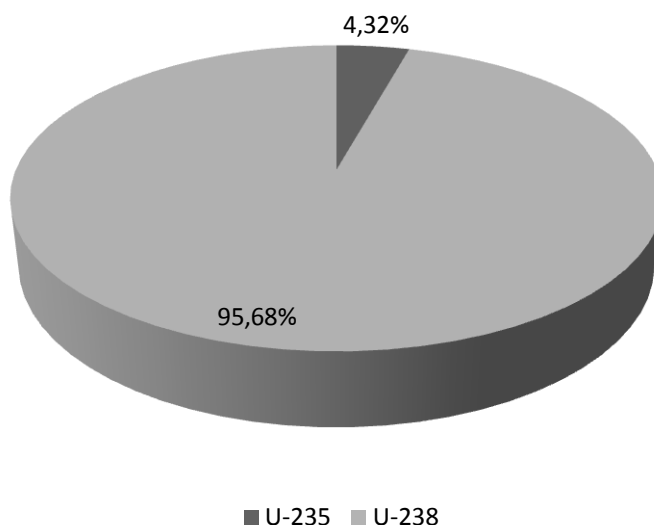
Fiktivním provozem reaktoru na vlastní spotřebu je poslední výpočet této práce. Tento typ regulace na tuto dlouhou dobu odzkoušen nebyl. Výpočet paliva probíhala podobně jako při předešlé regulaci. Nyní budeme regulovat na hodnotu 26 MWe. Výpočet probíhá takto:

$$P_{t-484MW} = \frac{P_t}{P_e} * P_{e\ reg} = \frac{1440}{510} * 26 = 73,41\ MWt \quad (7.5)$$

Dále si vypočítáme měrný výkon reaktoru:

$$p_t = \frac{P_t}{m_p} = \frac{73,41}{42} = 1,75\ \frac{MWt}{t}. \quad (7.6)$$

Pro takto nízký měrný výkon je procento vyhoření (zbytku štěpného prvku ^{235}U) paliva v reaktoru zobrazeno v obrázku 24.



Obrázek 26 Graf obohacení paliva po prvním roce regulace na vlastní spotřebu, která činí 26 MWe.

Takto vysoké procentuelní obohacení by zajisté mělo vliv na palivovou kampaň, nebo plánování odstávek. Shrnutí výpočtů je obsaženo v následující kapitole.

7.2.12 Vliv dlouhodobé regulace na provoz reaktoru

Krátkodobá regulace výkonu bude mít nepatrný vliv na palivo v reaktoru. Dlouhodobé regulování výkonu by zajisté mělo vliv na vyhoření paliva, které ovlivňuje plánované odstávky. Při dlouhodobé regulaci by se délka palivového cyklu musela měnit v závislosti na velikosti a délce regulace, ale hlavním ukazatelem by byla míra vyhoření paliva v reaktoru. Tímto by se mohla prodloužit již pevná plánovaná odstávka o několik dnů až týdnů. Odstávka však musí být v souvislosti s odstávkami ostatních reaktorových bloků, s čím se musí uvažovat u elektrárenských bloků takového výkonu.

Návrh navezeného paliva se musí přizpůsobovat individuálně vůči vyhoření paliva a poskládání aktivní zóny reaktoru tak, aby docházelo k rovnoměrnému zatěžování reaktorové nádoby. Délka cyklu paliva by však mohla zůstat na již prověřeném pětiletém cyklu. Tento cyklus by se však dal pozměnit v závislosti na procentu vyhoření paliva, které by se mohlo využít do maximální hodnoty, která bývá asi 3,3% ^{235}U a štěpné produkty a zbytek tvoří ^{238}U .

Nejdůležitějším členem jaderné elektrárny je reaktorová nádoba, která ovlivňuje životnost elektrárny. Z toho důvodu musí být reaktorová nádoba zatěžovaná rovnoměrně a v případě povrchových nedostatků a snižování životnosti reaktorové nádoby, je možnost částečně prodloužit životnost pomocí žíhání vnitřního povrchu nádoby. V dnešní době nemá pouze životnost elektrárny na prodloužení životnosti, důležitým ukazatelem pro prodloužení životnosti EDU je její ekonomická návratnost. Výhoda regulace je především v tom, že podpůrné služby jsou finančně řešeny speciálně a ekonomicky výhodnější. I když reaktorový blok není provozován na plný výkon, ekonomicky je takto brán. Navíc je poskytování podpůrných služeb zpoplatněno. Nákladnost výroby na jednotku kWh, která nyní dosahuje okolo 50 haléřů. Tato hodnota oproti Temelínu, která dosahuje 35 haléřů na kWh. Pokud by se podařilo snížit hodnotu,

Dukovany by měli větší pravděpodobnost delší životnosti. Další kladný vliv má na prodloužení životnosti i na možnost velké regulace a poskytování podpůrných služeb, především slouží jako kompenzátor jalového výkonu v síti, který snižuje ztráty způsobené na vedení. Vliv má také poloha Dukovan, kdy v okolí není větší energetický zdroj, což ukončení výroby by mělo velké následky na oblastním stavu parametrů v síti, ale především ztráty na vedení by byli rozměrnější. Především by se musel změnit energetický mix ČR, který je sice stavěn na tepelných elektrárnách, ale podíl EDU v síti, který činí 17,8% je výrazné číslo[22].

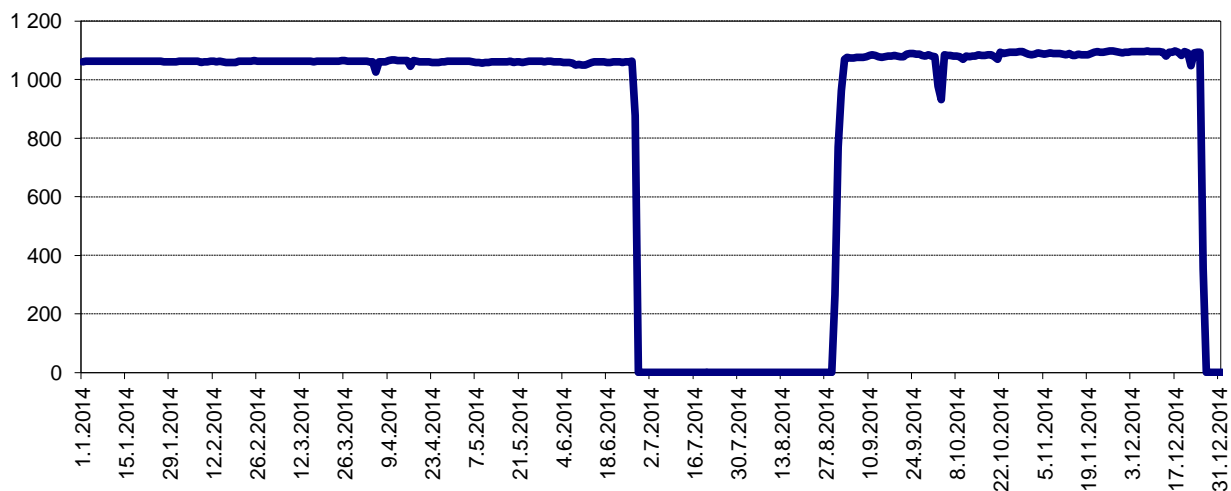
7.3 Regulace výkonu JE Temelín

Jaderná elektrárna Temelín sice certifikuje Podpůrné služby, avšak ne moc často je vykonává. Během roku 2014 byla pouze jednou využita služba“ na telefon“ neboli redispečink, kde lze vidět hodnoty v tabulce. Dále bylo 5x na požadavek Dispečinku ČEZ regulován výkon z důvodu nízké energie na trhu.

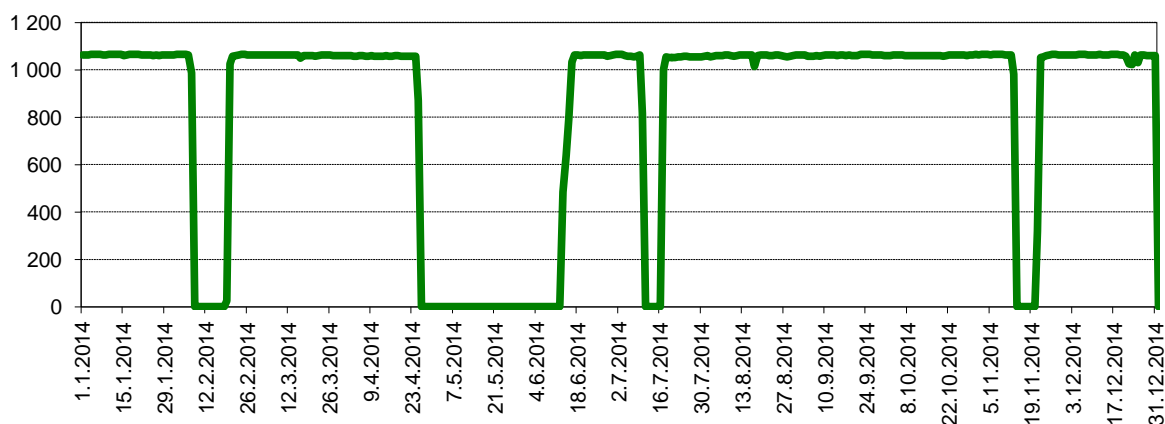
Sice se temelínské bloky často nevyužívají pro regulaci výkonu, jsou však schopny regulovat o mnohem více. První temelínský blok dokáže zregulovat výkon až na polovinu svého nominálního výkonu, což dělá 500 MWe. Tohoto výkonu však dosáhli až po výměně turbíny, pro kterou tato regulace nemá velký vliv. Před touto výměnou však první blok nedokázal regulovat výkon o více než 300 MWe[22].

Tabulka 7-6 Typy regulací na každém bloku ETE[22].

Bloky	Typ	Počet	Celkem
ETE	Regulace	Hodin	MWh
RB1	Redispečink	0	0
	Snížení výkonu na požadavek TD ČEZ	6	1 106
RB2	Redispečink	3	244
	Snížení výkonu na požadavek TD ČEZ	23	3 775



Obrázek 27 Graf průběhu výkonu 1. reaktorového bloku ETE v MWe[22].



Obrázek 28 Graf průběhu výkonu 2. reaktorového bloku ETE v MWe[22].

8 ZÁVĚR

V České republice probíhala éra obnovitelných zdrojů energie a jejich daňová výhodnost narušila chod soustavy. Největší problém z hlediska obnovitelných zdrojů je nepředvídatelnost výroby energie z důvodu přírodních následujících dějů, což vede ve větším množství těchto výrobních bloků ke kolísání energetické bilance v síti. Dále zabezpečení toků elektrické energie ze zahraničí se může ovlivňovat díky transformátorům s regulací fází, což ČEPS bere v úvahu, ale jednání se sousedními státy zejména Německem se daří domluvit. Z důvodu přetoků výkonů přes hranice je nutné regulovat energeticky a cenově výhodnější zdroje energie, což jsou Dukovany a Temelín. Instalací transformátorů s posunem fáze dokážeme částečně tlumit energetické nárazy ze sousedních států, další část dokážeme absorbovat do sítě, kdy můžeme propojit potřebné sítě k uchování stability. Dalším aktivním členem proti možnosti poškození energetickými přetoky mohou být velké elektrárenské bloky, které jsou například Dukovany a Temelín. Dukovany již mohou zregulovat na již dost nízkou hodnotu, hodnotu potřebná pro vlastní spotřebu. Tuto hodnotu můžou udržet na několik hodin. Limity regulace výkonu jsou nyní předem dány a nesmí se překročit. Pokud by regulace byli na kratší čas a mnohem víc, než

udávají limity, muselo by se individuálně propočítat osazení reaktoru. Palivová kampaň by musela být pružná na co maximální využití paliva. Délka provozu reaktoru by se po určitém počtu regulací mohla prodloužit o několik týdnů. Tím pádem by se zlepšila ekonomická stránka provozu reaktorového bloku. Temelín tuto možnost na delší dobu nemůže, avšak práce na druhém bloku, kdy se daří zregulovat výkon na polovinu nominálního je úžasné. Tím se dokáže Temelín bránit vůči možnosti vzniku Blackoutu.

Tato práce má význam zejména z pohledu využití energie z jádra a dále možnosti zabezpečit českou přenosovou soustavu z pohledu přetoků energetických toků především ze západního či středního Německa. Tyto nečekané toky by měla ES absorbovat a nechat je přetéci dál do oblasti s nedostatkem energie. Regulace, celkově podpora podpůrných soustav a využití hodnot záporných cen energie dokáže ušetřit a snížit hodnotu vyrobené kWh, která by měla pak význam z hlediska možnosti výstavby dalších reaktorových bloků, ale i prodloužení životnosti jaderné elektrárny Dukovany. Stáří reaktorových bloků se pohybuje kolem 30 let. Pro udržení jaderné energetiky v České republice by bylo vhodné začít plánování výstavby nových bloků. Tyto plány budou záviset na rozhodnutí vlády a jejich přístupu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BLAŽEK, V. Distribuce elektrické energie. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií [cit. 2015-01-16]. Skripta. Dostupné z: <http://www.vutbr.cz/elearning>
- [2] Oficiální stránka ENTSO-E. About ENTSO_. [online]. 15.1.2015 [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: <https://www.entsoe.eu/about-entso-e/Pages/default.aspx>
- [3] Jaderné elektrárny. Find the data. [online]. 15.1.2015 [cit. 2015-01-15]. <http://nuclear-power-plants.findthedata.com>
- [4] Oficiální stránky ČEPS a.s.. Kodex přenosové soustavy. [online]. 15.1.2015 [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Stranky/default.aspx>
- [5] Oficiální stránky ČEPS a.s.. FAQ. [online]. 15.1.2015 [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Media/Stranky/FAQ.aspx>
- [6] DOLEŽAL, J, BOUČEK S a kol. Učební texty pro výuku ČVUT. Jaderné a klasické elektrárny. [online]. 15. 1. 2015 [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz/wiki/Vyuka>
- [7] NEJEDLÝ, P. Neviditelný pes. Lidovky.cz: NĚMECKO: Uhelny paradox energetické revoluce. [online]. 29. 5. 2012 [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: http://neviditelnypes.lidovky.cz/nemecko-uhelny-paradox-energeticke-revoluce-f3k-p_ekonomika.aspx?c=A120527_174649_p_ekonomika_wag
- [8] WAGNER, V. Jak ovlivní Fukušima elektroenergetiku v Evropě?. OSEL. CZ. [online]. 28. 5. 2011 [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=5700>
- [9] Jaderná energetika. Čez.cz: Temelín. [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: [9] <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete.html>
- [10] LUKÁČ, P. USA nabízejí půjčku až na polovinu Temelína. Cena dostavby dosáhne až 300 miliard. Hospodářské noviny. [online]. 30.7.2013 [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: <http://byznys.ihned.cz/c1-60338620-usa-nabizeji-pujcku-az-na-polovinu-temelina>
- [11] Jaderná energetika. Čez.cz: Dukovany. [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/edu.html>
- [12] Virtuální průvodce. Čez.cz. [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: <http://virtualniprohlidky.cez.cz/cez-dukovany/>
- [13] Jaderná energetika. Čez.cz: Temelín. [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete.html>
- [14] ČEZ, a.s. Sborník přednášek pro letní univerzitu. Dukovany, 2014.
- [15] ZDENĚK, K. Google mapy. Panoramio. [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: http://www.panoramio.com/user/2296020?with_photo_id=17946002
- [16] Máslo K. Řízení frekvence – bilance činných výkonů v ES. Řízení ES. [online]. 15.1.2015 [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/res/Prednaska_Rizeni_frekvence3_Maslo.pdf.

- [17] Oficiální stránky ČEPS a.s. Regulace činného výkonu. [online]. 15. 1. 2015 [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Podpurne-sluzby/KategoriePpS/Stranky/default.aspx>
- [18] PTÁČEK, J.: Regulace toků výkonů v propojených elektrizačních soustavách. Brno, 2004. 201 s. *FEKT VUT v Brně*. Disertační práce
- [19] SMETANA, J. *Jaderná paliva pro tlakovodní jaderné reaktory*. Brno, 2014. 55 s. Bakalářská práce. Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně.
- [20] Transformátory s řízeným posuvem fáze do roku 2016. *Transformátory s řízeným posuvem fáze do roku 2016*. 2014. Dostupné také z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/transformatory-s-rizenym-posuvem-faze-do-roku-2016_27203.html
- [21] HELBICH, J. *Využití phase-shift transformátorů v přenosových soustavách* [online]. ČVUT v Praze, 2015 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61113/F3-DP-2015-Helbich-Jiri-vyuziti_phase_shift_transformatoru_v_prenosovych_soustavach.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce.
- [22] FEJTA, L., ČEZ a.s., konzultace, ústní sdělení, EDU,20.2., 27.3. a 17.4.2015.
- [23] LOVECKÝ, M. et al. UWB1 – Fast nuclear fuel depletion code. *Annals of Nuclear Energi*. 2014, č. 71:333-339. ISSN 0306-4549