SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Marek Špok

Současné a budoucí úkoly jaderné energetiky ve výrobě elektrické energie.

Autoreferát dizertační práce

na získání akademického titulu **Philosophiae Doctor, PhD.**

v doktorandském studijním programu **5.2.30 – Elektroenergetika**

Bratislava, 2014

Dizertační práce byla vypracovaná v externí formě doktorandského studia na Fakultě elektrotechniky a informatiky Slovenské technické univerzity v Bratislavě

Předkladatel: **Ing. Marek Špok**
Slovenská technická univerzita v Bratislavě
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikované elektrotechniky

Školitel: **prof. Ing. František Janíček, PhD.**
Slovenská technická univerzita v Bratislavě
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikované elektrotechniky

Oponenti: **Ing. Zoltán Kovács, CSc.**
RELKO, s.r.o Bratislava

prof. Ing. Vladimír Nečas, PhD.
Slovenská technická univerzita v Bratislavě
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústavu jaderného a fyzikálního inženýrství

Autoreferát byl rozeslaný: .....

Obhajoba dizertační práce se koná : ..... v ..... hodin před komisí pro obhajobu dizertační práce ve vědním odboru 5.2.30 Elektroenergetika vyjmenovanou předsedou společné odborové komise ze dne..... na Fakultě elektrotechniky a informatiky Slovenské technické univerzity v Bratislavě.

.....
prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.
děkan FEI

Obsah

Teze dizertační práce		4
Úvod		5
1	Současný stav problematiky	6
2	Alternativy výroby elektrické energie	9
2.1	Potřeba elektrické energie	9
2.2	Dodávka elektrické energie	10
2.3	Paliva používaná při současné výrobě elektřiny	11
2.4	Zajištění budoucí elektrické energie v základním zatížení	12
2.5	Obnovitelné zdroje energie	13
3	Výstavba a náklady na výstavbu jaderných elektráren	15
3.1	Rozvoj jaderné energetiky	15
4	Bezpečnost jaderných elektráren	18
4.1	Úkoly při tvorbě nové jaderné bezpečnosti	18
5	Vyřazování jaderných elektráren z provozu	20
6	Přínos práce a výsledky	23
6.1	Licenční proces	23
6.2	Projektová příprava	24
6.3	Realizace projektu a provoz JE	25
Seznam literatury		27
Publikace autora příbuzné k tématu dizertační práce		28

Teze dizertační práce

- Popis využití alternativních zdrojů energie pro výrobu elektrické energie v podmínkách středoevropského regionu a Slovenska, výhody a nevýhody jejich uplatnění.
- Popis bezpečnostních problémů spojených s využíváním jaderné energie pro výrobu elektřiny, současný stav a možné problémy v budoucnosti.
- Optimalizace finančních nákladů na výstavbu, provoz a vyřazování z provozu jaderných elektráren a možnosti pro vytvoření cenově konkurenceschopné jaderné elektrárny.
- Argumentace, že jaderné elektrárny mají nenahraditelné místo ve výrobě elektřiny ne jen v současné době, ale také v daleké budoucnosti a to jak evropském, tak i v celosvětovém měřítku.

Úvod

Během posledních několika desetiletí se mnohé očekávaní, týkající se alternativních zdrojů výroby elektrické energie ukázaly jako nereálné. Současný návrat do reality však nevedl ke zpomalení nebo úplnému zanedbání jejich vývoje. Alternativní zdroje se nadále vyvíjejí a aplikují tam, kde jsou k tomu vytvořeny vhodné podmínky. Energetické zdroje mají být přizpůsobeny konkrétním energetickým potřebám. Taková činnost musí mít přednost před rozšiřováním dodávky kvalitní elektrické energie tam, kde se například požaduje méně kvalitní teplo. Nebo využívání plynu k výrobě elektrické energie ve velkém měřítku jen z důvodu nízkých nákladů na realizaci zdroje, resp. krátké doby potřebné k jeho výstavbě.

Když si však položíme otázku ohledně využívání jaderné energie, můžeme se setkat i s názory přející si návrat do doby, než lidstvo začalo jádro využívat k výrobě elektrické energie. Situace, která je v současnosti v Evropě může být poučná: Francie vyrábí více jak 75% své elektrické energie z jádra. Je největším světovým exportérem elektrické energie, z čehož má roční příjem asi 2,5 miliardy € za rok. Na druhé straně však Itálie, jako důležitá průmyslová země, neprovozuje žádné jaderné zdroje. Je to naopak největší importér elektrické energie, které většina pochází právě z Francie. Strategie Německa a Švédska v oblasti jaderné energetiky je zjevně nerealistická a vychází více z politického než technického hlediska. Současné, ale i budoucí úkoly jaderné energetiky se neomezují pouze na výrobu elektrické energie, ale rozšiřuje se uplatnění i v jiných průmyslových odvětvích, což je však mimo rozsah této práce. Po úvodu je v druhé části práce popsán současný stav problematiky.

Předmětem třetí části této práce jsou alternativní zdroje elektrické energie, včetně plynu, uhlí, ropy, obnovitelných zdrojů energie a jaderné energie z hlediska jejich využívání v základním, pološpičkovém a špičkovám zatížení denního diagramu zatížení elektrizační soustavy. Ve čtvrté části se pojednává o bezpečnosti jaderných elektráren po havárii, který byla na JE Fukushima.

Pátá část je věnována stavu jaderné energetiky před a po havárii JE Fukushima-Daichii, finančním nákladům výstavby jaderných elektráren, které mají a i v budoucnosti budou mít největší potenciál pro dodávku elektrické energie v základním zatížení. Zde se porovnávají náklady jaderných elektráren s ostatními elektrárnami a popisují se možnosti vytvoření cenově konkurenceschopné jaderné elektrárny. V šesté části jsou závěry a doporučení.

1 Současný stav problematiky

Krize, která byla v padesátých létech minulého století, politické uspořádání světa a důraz na primární zdroje energie, přinutily světové velmoci, seriózně počítat s jadernou energií jako alternativou k fosilním palivům. Vzniká řada technologií, projektují se, stavějí a uvádějí se do provozu různé typy reaktorů. Pro průmyslové využití se však osvědčily pouze některé z velkého množství reaktorů a elektráren, které v té době vznikaly. V současnosti je v provozu nejvíce tlakovodních a varných reaktorů.

Ropné krize, problémy s dobýváním uhlí i výsledky vojenského výzkumu vyústily do silného rozvoje jaderné energetiky. Světové velmoci si uvědomovaly, jaké možnosti tento druh energetického průmyslu poskytuje a vzniká nové, silné odvětví ekonomiky, které je zaměřeno na vývoj a výrobu komponentů, zařízení a systémů pro jaderné elektrárny. Vysoké technologické požadavky současně vedou k rozvoji technologií a systémů kvality, včetně diagnostiky a testování.

Absolutní priorita bezpečnosti přivádí jaderný průmysl na první místo, co se týče úrovně technologie a bezpečnostních opatření, před letecký průmysl, který byl v této oblasti dominantní.

Podíl jaderné energie na výrobě elektrické energie se neustále zvyšuje. V některých státech, které mají nedostatek fosilních paliv, je už víc jak polovina elektrické energie vyrobená v jaderných elektrárnách. Začíná se objevovat také nový argument pro rozvoj jaderných elektráren – identifikace a kvantifikace škod na životním prostředí, způsobených spalováním fosilních paliv.

Zdánlivě nedořešený konec jaderného palivového cyklu, tři historické havárie – Three Mile Island, Černobyl a Fukushima-Daiichi, podvědomé spojování jaderné energetiky s jadernými zbraněmi, ve spojení s investiční náročností jaderného programu, která vyžaduje zapojení státu, způsobily, že se část veřejnosti v současné době odklání od podpory jaderné energie. Následně se pak z této části veřejnosti formují odpůrci tohoto druhu výroby elektřiny.

Vytrvalým působením různých aktivistů, kteří se spojují do více, či méně militantních “ekologických“ organizací a předkládají veřejnosti pseudoargumenty o škodlivosti a nesprávnosti využívání jaderné energie, ve spojení s tvrdým nástupem konkurence ve formě fosilních paliv, se ve veřejnosti pomalu začínají rozšiřovat názory, že s jadernou energetikou není něco v pořádku. Když k této hrozbě přistoupí ještě i geopolitické argumenty a proces tvorby veřejného mínění v hlavních městech menších evropských zemí, může se stát, že se jaderná energetika dostane na periférii oblíbenosti u veřejnosti.

Směrem do vlastních řad je však třeba konstatovat, že jaderná energetika a jaderný průmysl k této neoblíbenosti částečně přispěl i sám. Již zmiňované podvědomé spojování jaderné energetiky s jadernými zbraněmi, ale i využívání některých výsledků vojenského výzkumu, přísná ochrana informací, která v některých případech vedla až k informačnímu embargu, nadstandardní fyzická

ostraha jaderných zařízení a výška odměňování zaměstnanců pracujících jak v manažerských, tak i řadových pozicích, byly argumenty, které k popularitě jaderné energetiky rozhodně nepřispěly.

Silná opozice konkurenčních technologií přinesla plynové spalovací turbíny, plynové motory, paroplynový cyklus, fluidní technologie, odsiřovací zařízení, denitrifikace, čisté uhelné technologie a cenově přitažlivé nabídky importovaných palivových surovin. V průmyslově vyspělých zemích se prakticky zastavila výstavba bloků jaderných elektráren.

Shrňme si, jaké pro to byly důvody:

- Instalovaný výkon stávajících elektráren je dostačující pro pokrytí dnešní spotřeby elektřiny a to i při započítání předpokládaného nárůstu spotřeby v nejbližším období;
- Vstup soukromých společností do výroby elektrické energie a otevření trhu;
- Odstoupení států od řízení výroby elektrické energie;
- Převis nabídky elektrické energie z okolních zemí;
- Dostatek elektrické energie v základním zatížení;
- Komplikované podmínky povolování a licencování.

Tyto hlavní příčiny způsobily, že se výstavba jaderných elektráren ve vyspělých průmyslových státech zpomalila. Nehoda, ke které došlo v březnu roku 2011 v jaderné elektrárně Fukushima-Daiichi, vyvolala ve světě novou vlnu zájmu nejen o jadernou energetiku, ale o energetiku a bezpečnost dodávek elektrické energie, obecně. Havárie vyvrátila mýtus o bezpečnosti jaderné energetiky v zemi, která se nachází v oblasti s vysokou seismickou aktivitou. Japonsko na základě této havárie zastavilo provoz jaderné elektrárny a odstaví i výzkumné reaktory. S výjimkou dvou, které patří univerzitě v Kjótu.

Jaderná energetika však bezesporu má budoucnost. Počet již provozovaných jaderných bloků ve světě a jejich podíl na celkové výrobě elektrické energie dokazují, že toto odvětví hraje důležitou roli. Stále rostoucí počet obyvatel zeměkoule a humanistická myšlenka zajistit všem, tedy i obyvatelům rozvojových zemí, srovnatelné životní podmínky jako mají obyvatelé průmyslových zemí, jsou předpoklady, které při nejaderných variantách rozvoje signalizují mohutný nárůst emisí skleníkových plynů a z toho vyplývající globální změnu světového klimatu. Možné postoje zemí třetího světa k těmto problémům se dají odvodit z průběhu jednání o snižování emisí skleníkových plynů při konferenci v Kjótu, kdy hlavně tyto země odmítaly závazky na snižování emisí.

Hledání forem získávání energie pro následující desetiletí se v některých případech opírá o větší využití alternativních zdrojů. Avšak i největší optimisté připouštějí, že masové nasazení nových alternativních zdrojů se ještě nedá očekávat a lidstvo stále neumí využít s vyšší účinností velké množství energie, které dopadá ze Slunce na Zem. Fotovoltaické články a vrtule větrných elektráren mají zatím velmi nízkou účinnost a mnoho nedostatků. Jejich největší

nevýhodou je nemožnost efektivně skladovat vyrobenou elektrickou energii k použití, kdy je tma nebo bezvětří.

Největším využitím, co se obnovitelných zdrojů elektrické energie týče, se vyznačuje hydroenergetika. Průtočné a akumulační vodní elektrárny se uplatňují na celém světě, avšak ne vždy se při budování kaskád podaří zachovat řece její přirozený charakter. Přečerpávací vodní elektrárny pak pomáhají zajistit stabilitu a spolehlivost dodávek elektrické energie. Geotermální energie je zajímavá alternativa, je však dostupná jen v některých oblastech.

Energetické využití odpadů a spalování biomasy rozhodně přispívá ke zlepšení hospodaření lidstva, nicméně na druhé straně přispívá ke tvorbě oxidu uhličitého. Otázka trvale udržitelného rozvoje je pro budoucí generace realizovatelná jen s pomocí jaderné energetiky a vhodná kombinace jaderných, vodních a alternativních zdrojů může být pro všechny kontinenty akceptovatelná cesta.

V únoru 2012 se v Paříži uskutečnilo setkání nového sdružení, kterého se zúčastnili představitelé států EU využívajících v současnosti jadernou energii (jedná se o všechny země EU s výjimkou Belgie a Německa) za účasti Litvy, Polska, Lotyšska a Estonska. Cílem tohoto neformálního sdružení je podpora rozvoje jaderné energetiky.

Realizace strategie postupného zříkání se jaderných elektráren není nijak levná záležitost (experti vypočítali, že Německo bude tato strategie stát do roku 2030 částku, která je na úrovni 65 % ročního HDP). Navíc bude potřeba vykompenzovat ztráty ve výrobě elektrické energie. A to buďto zvýšením dovozu samotné elektrické energie nebo zvýšit import dodatečných zdrojů energonosičů. Toto však zvýší závislost EU na dovozech energetických zdrojů, což zase odporuje politice zvyšování energetické bezpečnosti.

Ve prospěch využívání jaderné energie i do budoucnosti, hovoří především následující faktory:

- vyčerpatelnost energetických zdrojů,
- znečisťování životního prostředí,
- ekonomický faktor (v porovnání s nákladnou alternativní energetikou).

Z výše uvedeného vyplývá, jaderná energetika má své nesporné místo v energetické budoucnosti, přestože v posledních létech její využívání poněkud stagnuje. Jaderná energie, která je spolu se zemním plynem nejekologičtějším palivem, zůstane i v dalších létech důležitou součástí energetického mixu. Její využití, společně s OZE, na výrobu elektrické energie a zavedení energeticky úsporných technologií, vytváří široké spektrum možností na snížení emisí skleníkových plynů vznikajících při spalování fosilních paliv, jejichž zásoby jsou limitované a rychle ubývají.

2 Alternativy výroby elektrické energie

2.1 Potřeba elektrické energie

Potřeba elektrické energie společnosti je daná poptávkou průmyslu, obchodu, veřejné dopravy a domácností. Odběr elektrické energie se mění jak v průběhu 24 h intervalu, tak i během týdne a mění se i s ohledem na roční období. V závislosti od poptávky, podnebí, a dalších faktorů se mění od místa k místu a od státu ke státu.

Základní zatížení během pracovního dne je cca 60 % maximálního zatížení. Tato křivka zatížení je typická pro rozvinuté země. Tvar křivky se bude zjevně měnit podle druhu odběru. Špičky odrážejí odběr domácností, který se týká normálního pracovního dne, s odběry elektrických teplovodních systémů domácností během noci. Základní zatížení je kolem 4 100 MWe, což kryjí eletrárny provozované v základním zatížení. Pološpičkové nebo špičkové zatížení převážně kryjí vodní a plynové turbíny. Elektrárny se při obchodování s elektrickou energií ucházejí o odbyt vyrobené elektrické energie, takže ekonomické faktory mají tendenci určovat zdroje dodávky v každém konkrétním momentu. [1,2]

Potřeba krytí základního zatížení nepřetržitou, spolehlivou a velkokapacitní dodávkou elektrické energie je klíčovým faktorem v jakékoliv soustavě. Stejně tak jako denní a týdenní odchylky v odběru, existují i postupné změny, které se každoročně vyskytují v charakteru odběru elektrické energie. Při plánování charakteru odběru na více let do budoucna se musí vzít v úvahu tyto faktory:

- změna charakteru sezónních špičkových odběrů, např. v letních měsících, kdy dochází k zapínání klimatizací,
- vliv zvýšené elektrifikace veřejné dopravy,
- možnost elektrifikace soukromé dopravy přímo, nebo prostřednictvím využití vodíku, který byl vyroben elektrolýzou v palivových článcích,
- vliv rostoucího využívání solární energie a zvýšení odběru elektrické energie v období s nepříznivým počasím,
- vliv stimulů na zvýšení mimošpičkového odběru elektrické energie (a minimalizaci špičkového odběru) na ohřev teplé vody a vytápění,
- praktický účinek opatření směřujících k úsporám elektrické energie, např. projekty energeticky efektivnějších budov a spotřebičů,
- obnovitelné zdroje energie, které zajišťují výrobu elektrickou energie, jen když je to možné a politický nátlak spojený s přednostním výkupem anebo dodávky elektrické energie při vyšších nákladech než u jiných zdrojů,
- zvýšení další rozptýlené formy výroby elektrické energie,
- potřeby a změny potřeb v průmyslu,
- zlepšení schopností přenosu elektrické energie na velké vzdálenosti, např. před 50-ti lety byla maximální vzdálenost pro efektivní přenos cca

600 km, poté v dalších desetiletích, nové technologie umožnily přenos na vzdálenost větší než 2 000 km a dnes už tyto technologie umožňují přenos i na větší vzdálenosti než je 2000 km. [3,4]

Perspektivně můžeme vidět využívání elektrické energie v základním zatížení k nabíjení baterií pro osobní automobily. Popularita hybridních vozidel, např. Toyota Prius a taky nový přístup k hybridním automobilům s naftovým motorem automobilky Honda, nás v minulých létech posunuly k praktickému "elektro-mobilismu". Tento vývoj byl umožněn díky nástupu daleko účinnější technologie baterií, přičemž další zvýšení kapacity baterií zvyšuje možnost využití energie z mimošpičkového výkonu, nabíjením při nočním parkování. To bude znamenat menší závislost na spalovacích motorech a větší spolehnutí na energii základního zatížení. Nikl-hydridová baterie automobilu Toyota Prius při hmotnosti 45 kg dodává 21 kW. Vydrží 6,6 Ah při 201 V (1,3 kWh), a má záruku 8 let, t.j.160 000 km. [2]

Některé z těchto faktorů ovlivní celkovou spotřebu elektrické energie, zatímco jiné ovlivní relativní důležitost odběru v základním zatížení. Ekonomika výroby bude vyžadovat, aby se co jak možno nejvíce elektrické energie dodávalo z elektrárny, která vyrábí v základním zatížení. Strategie vlád mnoha zemí však vytvářejí rámec pro příležitostný příkon jakékoliv výrobní kapacity z obnovitelných zdrojů, připojených k soustavě.

2.2 Dodávka elektrické energie

Vzhledem k velkým výkyvům odběru v průběhu dne je běžné mít několik typů elektráren klasifikovaných jako elektrárny základního, pološpičkového nebo špičkového zatížení.

Turbíny elektráren základního zatížení jsou obvykle poháněny parou (vyrobenou z uhlí nebo jádra) a pracují více méně nepřetržitě při téměř nominálním výkonu.

Elektrárny pološpičkového a špičkového zatížení musí být schopné rychlého připojení k síti a odstavení jednou nebo dvakrát denně. Pro výrobu v pološpičkovém a špičkovém zatížení se používají elektrárny, zajišťující výrobu elektrické energie v plynových turbínách, parních kotlích vytápěných plynem anebo ropou a hydroelektrárny.

Zařízení pološpičkového a špičkového zatížení charakterizují nízké kapitálové náklady a relativně vysoké náklady na palivo (mimo hydroelektráren…)

Elektrárna základního zatížení se projektuje s minimalizováním nákladů na palivo. Při nepřetržité výrobě elektrické energie se odepisují relativně vysoké kapitálové náklady spojené s výstavbou.

Nejnižší celkové náklady za energii pro spotřebitele se dosahují tehdy, když je přírůstek špičkového zatížení velmi malý a základní zatížení trvale využívá většinu pohotové výrobní kapacity. Každý blok elektráren je po určitou

dobu ve stavu odstávky nebo údržby. Z tohoto důvodu má být instalovaný výkon o cca 20 % větší jako maximální zatížení v soustavě, což poskytuje určitou rezervu.

Elektrárny základního zatížení tvoří více než polovinu celkové výrobní kapacity soustavy a vyrábějí více než 85 % celkové elektrické energie. Téměř jednu třetinu kapacity soustavy můžeme obecně klasifikovat jako elektrárny pološpičkového zatížení, které dodávají energii během pracovního dne a večer. Vyvážením, je v užším smyslu slova špičkové zatížení, které kryje krátkodobý odběr v průběhu denních intervalů vysokého zatížení, nebo v nouzových stavech.

Kapitálové náklady na zřízení zdroje špičkového zatížení jsou asi poloviční, jako na elektrárnu základního zatížení a doba výstavby je podstatně kratší. Palivové náklady na jednotku vyrobené energie jsou ale v porovnání, např. s uhlím v elektrárně základního zatížení, relativně vysoké. Rozdíl snižují moderní paroplynové elektrárny, které mají daleko vyšší účinnost než uhelné elektrárny.

Přečerpávací vodní elektrárny tvoří alternativu k tepelným elektrárnám, které jsou provozovány v pološpičkovém nebo špičkovém zatížení tam, kde to topografie umožňuje. Voda se přečerpává pomocí využitelné výkonové kapacity v základním zatížení přes noc a o víkendech. Takováto zařízení ovlivní zvýšení rozsahu, ve kterém elektrárny základního zatížení přispívají k celkové výrobě. Je zde však ztráta účinnosti asi 35 %.

V budoucnosti bude možno příspěvek základního zatížení zvýšit využitím přebytku energie v nešpičkových obdobích na výrobu vodíku, který se pak použije na špičkovou výrobu anebo jako palivo pro dopravu. Dalším využitím elektráren v základním zatížení je možnost, sledovat v jistém rozsahu zatížení změnou výkonu.

Tak jako i v jiných odvětvích průmyslu, existují zde úspory z velkovýroby. Větší elektrárenské bloky vedou ke snížení kapitálových nákladů na jeden kilowatt výkonu, hlavně u elektráren základního zatížení. Tzn., že lokalitu takovéto elektrárny určuje více možnost dodávky chladící vody než zdroj paliva. K tomu, aby bylo možné velké elektrárenské bloky efektivně provozovat, je zapotřebí rozsáhlá přenosová soustava a celkový výrobní systém. Existuje však hodně případů, kdy se z ekonomických důvodů navrhují malé elektrárny na paroplynový cyklus. [5,6]

2.3 Paliva používaná při současné výrobě elektřiny

Tato práce posuzuje výrobu elektrické energie, která tvoří v průmyslových zemích asi 40 % primární dodávky energie. Rostoucí omezení výběru paliva způsobují emise uhlíku.

V hustě obydlených částech světa, např. v Japonsku a mnohých částech Evropy a Severní Ameriky, jsou zdroje uhlí poměrně odlehlé od odběru elektrické energie. Výhody uhlí však neomezují jen náklady, ale i hlediska životního

prostředí. Kritéria na palivo vhodné pro výrobu elektrické energie v základním zatížení je možno vyjádřit takto:

- mělo by být relativně levné, poskytující nízkonákladovou energii;
- pokud palivo není možno dodávat z elektrárně blízkého zdroje, mělo by být v ideálním případě koncentrovaným zdrojem energie, který je možno ekonomicky přepravovat a snadno hromadit;
- měl by se brát zřetel na omezený výskyt zdroje a alternativní hodnotné aplikace (např. přímé spalování anebo chemické suroviny);
- nakládání s odpady, které vzniknou při energetickém využití paliva, by mělo být takové, aby došlo k minimálnímu vlivu na životní prostředí, včetně dlouhodobého účinku na globální oteplování;
- použití paliva musí být bezpečné při běžném provozu i v podmínkách při havárii.

Ze základních paliv pro výrobu elektrické energie v základním zatížení, vyhovuje těmto podmínkám nejvíce uran, následován uhlím a plynem. Zvláště když se musí uhlí přepravovat na velké vzdálenosti. Energetické strategie jednotlivých zemí se liší podle palivových zdrojů dostupných v každé jednotlivé zemi, ekonomiky dovozu paliv (anebo elektřiny), rozsahu industrializace a zabezpečením dodávek. Energeticky bohatá země, např. USA má hodně možností. Avšak i v některých oblastech USA se doprava velkých množství uhlí na velké vzdálenosti výrazně projevuje v nákladech.

Japonsko má nedostatek vlastních zdrojů energie a téměř úplně se spoléhá na dovoz. Ropa byla v minulosti nejvhodnějším importovaným palivem a závisela od ní velká část energetických potřeb země, včetně výroby elektrické energie. Pak se k tomuto účelu začalo stále více využívat uhlí. Jaderné palivo má výhodu v tom, že představuje malý objem a náklady na dopravu jsou zanedbatelné. Další výhodou jsou odchylky v ceně paliva, které jsou daleko menší než u uhlí nebo plynu.

I v tomto století stále tvoří podstatnou část paliva používaného v každé zemi k výrobě elektrické energie, čím dál tím vzácnější a dražší ropa. Nejzřetelnější je to právě v Japonsku, které v posledních 30-ti létech výrazně snížilo svou závislost na výrobě elektrické energie z ropy a plánuje zvýšit podíl výroby z jaderné energie. Tyto plány jsou však v současné době pozastavené kvůli havárii jaderné elektrárny Fukushima. Rusko chce zvýšit podíl elektrické energie z jádra kvůli maximalizování vývozu plynu do Evropy. Velká Británie, ale i Rusko mají v současné době vysokou závislost na plynu. [1,7]

2.4 Zajištění budoucí elektrické energie v základním zatížení

Při úvahách do budoucna, za hranicí desetiletí, je zde několik praktických záležitostí, které nelze přehlédnout. Jednou z nich je doba potřebná k realizaci výstavby výrobního bloku. Dnešní finanční závazek spojený s velkým výrobním blokem základního zatížení znamená, že zařízení by se mělo uvést do provozu během pěti až deseti let. Pak se dá očekávat jeho provozní životnost 60 let.

Dnešní investiční rozhodnutí ohledně elektrárenského bloku tedy nemůžou měnit celkovou strukturu výrobního systému země na několik desetiletí.

Ani plynové turbíny s kombinovaným cyklem, které je možno uvést do provozu za méně než dva roky od data objednávky a které se staly v 90. létech minulého století velmi populární, nemůžou přinést podstatnou, krátkodobou změnu celkové situace zásobování energií. Pro uhelné a jaderné bloky, provozované v základním zatížení, je doba realizace výstavby delší. Z toho vyplývá, že ty, které jsou dnes provozovány, bude zapotřebí provozovat ještě několik dalších desetiletí. Nejde se jich ještě dlouhou dobu vzdát.

Další praktická záležitost se týká velikosti bloků. Je vhodné, když jsou některé technologie malé, vyžadují nízké mzdové náklady a jsou i efektivní. Ekonomické omezení při těžbě paliv a výrobě elektrické energie ale vyžadují, aby byly provoz a blok co jak možno největší. Snížením velikosti se jednotkové náklady neúprosně zvýší. V urbanizovaných a průmyslových zemích, kde je velký odběr elektrické energie soustředěn do malých oblastí, jsou instalace velkokapacitních konvenčních bloků nevyhnutelností.

Praktické důvody dlouhé doby realizace velkokapacitních instalací poukazují na potřebu důkladného posouzení budoucích trendů využívání elektrické energie i kvůli zajištění, aby elektrizační soustava účinně zvládla přenos a rozvod elektrické energie. Velkým strategickým problémem jsou neregulované obchody s elektrickou energií, které ztěžují financování výrobního bloku, i když je jeho výrobní produkce levnější. Na tuto problematiku je zapotřebí se více zaměřit ve většině zemí. Tomuto úkolu se musí přizpůsobit i použitá technologie. Velké výzvě, které čelí vlády určující strategie jednotlivých zemí, je určit nejvýhodnější prostředek výroby elektrické energie v základním zatížení do budoucnosti. Alternativy, které mají k dispozici jsou popsány v další části.

2.5 Obnovitelné zdroje energie

Slunce, vítr, vlny, řeky, příliv – odliv, stejně jako biomasa jsou označované jako „obnovitelné“. Doposud se do výroby elektrické energie významně zapojila jen energie klesající vody v řekách. 16 % světově vyrobené energie je z vodních elektráren, i když přílivové proudy a vítr tento živel možná doženou. Solární energii využívá člověk prostřednictvím fotosyntézy hlavně v zemědělství, lesnictví a stále více k výrobě tepla a elektrické energie. Biomasa se spaluje tam, kde se dá využít. Strategie vlád v zemích EU a OECD dbají o nárůst jejího využití. Generování přírodní geotermální energie odváděním podzemní páry je významné v některých lokalitách, kde k tomu jsou podmínky. Další se dnes málo využívají. Základní výhodou obnovitelných zdrojů je jejich hojnost a relativně široký výskyt. Základním problémem, hlavně dodávky elektrické energie, je variabilní a rozptýlený charakter solární a větrné energie.

V praxi to znamená, že musí existovat spolehlivé záložní zdroje elektrické energie, nebo jiné prostředky velkokapacitní akumulace energie. Mimo přečerpávacích vodních akumulačních elektráren v současné ani v dohledné době, žádné takové prostředky nejsou. Pro soustavu zůstává problém

akumulování energie prvořadým. Každé výrazné využití solární nebo větrné energie pro dodávku elektrické energie do sítě znamená, že musí existovat podpora téměř 100 % výkonové zálohy ve vodě nebo fosilních palivech. To vyvolává velmi vysoké výrobní náklady. Avšak v některých místech to může být obrazem budoucnosti.

V současnosti je mnoho tisíc větrných elektráren, provozovaných v různých částech světa, s celkovým výkonem 59 000 MWe. V minulém desetiletí to byly nejrychleji rostoucí prostředky výroby elektrické energie, poskytující hodnotný doplněk velkokapacitních elektráren základního zatížení. Tam, kde je ekonomicky účinná rezerva, kterou je možné vyzvat k činnosti ve velmi krátké době (např. voda), tak je možné významnou část elektrické energie zajistit pomocí větrných elektráren. Ekonomicky nejvýhodnější a nejúčelnější velikost komerčních větrných turbín je v současnosti až 2 MWe, seskupených do větrných farem s výkonem až 200 MWe. Některé nové turbíny v současnosti mají až 5 MWe. Většina turbín je v průběhu roku a v závislosti od lokality, provozována při koeficientu zatížení asi 25 % (evropský průměr) některé však dosahují až 33 %. Plánuje se, že v roce 2030 budou 3 % světové výroby elektrické energie, dosaženy pomocí větrných elektráren a v zemích EU to má být až 10 %.

Obnovitelné zdroje nelze regulovat tak, aby zajišťovaly nepřetržitou energii v základním anebo špičkovém zatížení tehdy, když je to potřebné. Proto se ve skutečných podmínkách omezují na 10 % výkonu elektrické sítě – eventuálně na 20 % v případě spřažení s nedalekou hydroelektrárnou. Nelze je přímo použít jako náhradu za zdroje využívající fosilní paliva nebo jádro, můžou se ale stát důležitými v oblastech s příznivými podmínkami. Tyto technologie můžou a taky budou užitečně přispívat zejména tam, kde existuje politická vůle subvencovat spotřebitele, i když tyto zdroje jsou nevhodné pro řešení hlavní zátěže dodávky elektrické energie.

Kdyby existoval způsob, jak by se daly účinně akumulovat velké množství elektrické energie z nespolehlivých zdrojů, např. ze solárních nebo větrných elektráren, jejich příspěvek k pokrytí odběru energie základního zatížení by byl o hodně větší. Bohužel v současnosti ještě nejsou dostatečně vyvinuty prostředky pro akumulování velkého množství elektrické energie, např. obrovské baterie nebo jiné prostředky.

3 Výstavba a náklady na výstavbu jaderných elektráren

Jak již bylo uvedeno v předcházející kapitole této práce, výroba elektrické energie nabízí spotřebitelům více palivových alternativ, včetně ropné, uhelné, plynové, jaderné, vodní, solární a větrné. Ani jeden zdroj nemá úzce monopolní vliv. Mnohé země se ale ve většině své výroby elektřiny opírají o uhlí a vzrůstající počet zemí využívá víc zemního plynu. Pokud jde o důvěru v jadernou energii, jen málo zemí vyrábí z tohoto zdroje 50 anebo více procent své energie. Francie získává z jádra více jak 75 % své výroby; Belgie a Slovensko vyrábějí z jaderné energie těsně nad polovinou své výroby elektřiny; Ukrajina vyrábí z jádra těsně pod polovinou své výroby elektřiny. [1] Dle studie společnosti Delloite, jsou náklady na výstavbu jaderného zdroje, adaptované na cenovou úroveň roku 2013, na úrovni 73,5 EUR/MWh (včetně započítání nákladů na decommissioning), což jsou v porovnání s dalšími zdroji druhé nejnižší náklady na výstavbu. Na porovnání uvádím náklady na výstavbu ostatních elektráren. Výstavba hnědouhelné elektrárny představuje 66,5 EUR/MWh, černouhelné 92,3 EUR/MWh, paroplynového cyklu 80,3 EUR/MWh, fotovoltaického systému 145,3 EUR/MWh a větrný elekrárny 86,2 EUR/MWh. K polovině roku 2014 je v celosvětovém měřítku ve výstavbě 72 reaktorů. 8.2.2014 začala výstavba elektrárny CAREM 25 (PWR reaktor o výkonu 25 MWe) v Argentině. Od počátku roku 2014 došlo k přifázování dvou PWR o výkonu 1080 MWe v čínské elektrárně Ninge 2 a 692 MWe v argentinské elektrárně Atucha 2.

3.1 Rozvoj jaderné energetiky

Poprvé byla vyrobená elektřina z jádra v experimentálním jaderném reaktoru nedaleko Arco-Idaho (USA) v roce 1951. První komerční jaderná elektrárna byla uvedená do provozu v Obninsku (bývalý Sovětský svaz) v roku 1954. Od této doby se jaderná energetika rozvíjí přes tři hlavní etapy. [8]

První etapa, která se datuje od roku 1954 do roku 1974, byla obdobím růstu. Až do roku 1965, se každý rok začala výstavba asi sedmi reaktorů. Proces výstavby se kolem roku 1970 urychlil a v následujících létech se začala výstavba až 37 reaktorů. První ropná krize v létech 1973 – 1974 ještě intenzitu růstu urychlila.

Druhá etapa byla od roku 1974 do poloviny prvního desetiletí 21. století. Objektivně se vyznačuje zpomalováním výstavby JE. Na konci druhé etapy se začala výstavba v průměru jen tří reaktorů ročně. Tento pokles byl zprvu způsoben vysokými náklady na výstavbu jaderných bloků a poté kolapsem cen ropy. Zpoždění a taky i v některých případech zrušení jaderných projektů, způsobila zlepšená dostupnost méně nákladných, modulárních a účinných paroplynových turbín. Situaci pak dále zhoršila havárie JE Three Mile Island (USA, 1979), která zapříčinila znepokojení veřejnosti, co se jaderné energetiky týče a posílila dozor nad jadernou bezpečností. Rozvoj jaderné energetiky byl pak zásadně poznamenán druhou katastrofální jadernou havárií v JE Černobyl (Ukrajina, 1986). Zpomalení vývoje jaderné energetiky bylo zapříčiněno také

nízkými cenami elektrické energie v 80 a 90 létech minulého století. Kapitálové investice na budování jaderných elektráren ztratily na své atraktivitě.

Třetí etapa byla od poloviny prvního desetiletí 21. století a trvala až do roku 2011. Obecně je tato etapa nazývána "jadernou renesancí". Jaderná energetika na celém světě zažívala stoupající trend, převážně kvůli rychlému rozvoji v zemích, které nejsou členy OECD (hlavně v Číně). Zájem o jadernou energetiku se dá zdůvodnit efektivitou nákladů v porovnání s fosilními palivy, nezpochybnitelnými environmentálními výhodami a národními zájmy týkajícími se zabezpečení dodávky elektrické energie.

I přes pokles v druhé etapě, třetí etapa vedla k nárůstu produkce elektřiny v JE. V polovině prvního desetiletí 21. století se výroba elektřiny z jádra zvýšila přibližně na 2 600 TWh a v průběhu posledních 10 let byla více či méně konstantní. Celkový podíl jaderné energetiky na světové výrobě elektrické energie se koncem 80 let minulého století zvýšil na hodnotu 17%. Pak ale začal klesat a v roce 20110 se tržní podíl snížil na 13,5 %. V současné době se podíl pohybuje kolem 15%.

Jaderná energetika zaznamenala průběžné zdokonalování technologie, včetně vývoje a zvýšení bezpečnosti. To vše na základech poznatků získaných při výstavbě a následném provozu JE. Tragické havárie v Three Mile Island a Černobylu, způsobené provozními chybami a chybami při údržbě, iniciovaly jak důkladné bezpečnostní analýzy zařízení, tak přepracování provozních předpisů a zvýšení kultury bezpečnosti. Obecně se zvýšila bezpečnost, vylepšily se procesy jak u dodavatelů, kteří projektují bloky a reaktory, tak u vlastníků, kteří provozují JE pod dohledem národních orgánů dozoru nad jadernou bezpečností. Tržní ceny vedly k modernizacím provozu JE, což se promítlo do vyšších koeficientů využití instalovaného výkonu. Toto je pak nevyhnutné pro vytvoření příznivých ekonomických podmínek pro takto kapitálově náročnou technologii. Díky těmto změnám se celosvětově zvýšilo využití instalovaného výkonu z 60% na 80%. V některých zemích, jako je USA, Finsko, Švýcarsko a Švédsko bylo dosaženo 90% využití instalovaného výkonu. Došlo k prodloužení životnosti bloků na základě poznatků o stárnutí materiálů, které byly získány při provozu a údržbě komponentů. Zvýšení využití instalovaného výkonu bylo dosaženo pomocí zdokonalených analýz funkčních charakteristik a hodnocením provozu metodou PSA. Došlo k vylepšení přístrojového vybavení a informačních systémů pro operátora, což taky podstatně přispělo k zvýšení bezpečnosti.

Mimo jiné taky docházelo k rozšíření a výměně provozních zkušeností díky Mezinárodní agentuře pro atomovou energii (MAAE), Světové asociaci jaderných provozovatelů (WANO) a Institutu pro provoz JE (INPO). Kolektivní snahy nezávislých externích kontrol a kontrol při obnovování licence po deseti létech provozu, udržují reaktory v bezpečném stavu. Zkušenosti získané při těchto činnostech byly inspirací i pro dodavatele reaktorů III. Generace, které jsou v současné době ve fázi výstavby v různých zemích světa. Nové reaktory mají projekční životnost 60. let a více jak 90% využití instalovaného výkonu, 12

až 24 měsíční cyklus výměny paliva, sníženou pravděpodobnost radiačních úniků mimo lokalitu a velmi nízké limity pro ozáření personálu.

Některé z nových projektů mají pasivní bezpečnostní systémy, které zabezpečí chlazení AZ reaktoru nezávisle od elektricky poháněných čerpadel a nevyžadují činnost operátora v průběhu prvních 72 hodin po výskytu havárie. Pokud by se vyskytla havárie s tavením aktivní zóny, většina nových projektů již má systém zadržování AZ v tlakové nádobě reaktoru.

I přes všechna tato provozní a technologická zdokonalení, zkušenosti z havárie JE Fukushima-Daiichi, která byla způsobená přírodní katastrofou, vyžaduje i nadále zvyšovat požadavky na bezpečnost. Vlády a provozovatelé JE na celém světě zareagovaly na znepokojení veřejnosti, co se týče bezpečnosti technologie a přijímají nová opatření proti externím vlivům.

4 Bezpečnost jaderných elektráren

Při prosazování nových průmyslových technologií byly počáteční úspěchy skoro vždy následovány nehodami, které však ve většině případů byly zdrojem nových poznatků a vedly ke zlepšení efektivity a bezpečnosti provozu. JE se za více jak padesát let provozu, staly uznávanými pro výrobu elektrické energie. Měly však vícero nehod a významných havárií, které vedly k lepšímu pochopení technologie získání nových poznatků. Umožnily tak vylepšit bezpečnost a spolehlivost provozovaných a nově budovaných elektráren. Po havárii Fukushima-Daiichi se začala tvořit nová jaderná bezpečnost, která jde nad rámec současných regulačních požadavků na bezpečnost JE. Tato norma má být přijata globálně, aby se všude na světě zabránilo podobným následkům.

Havárie JE Fukushima-Daiichi neodhalila žádnou fatální chybu jaderné technologie, inicializovala však zvýšení jaderné bezpečnosti ve světě na základě získaných poznatků. Nevyskytly se okamžité úmrtí z radiace ani opožděné radiační následky na zdraví obyvatelstva. Zdravotní následky jsou tedy relativně malé díky přijatým ochranným opatřením, inherentně pomalému jadernému úniku z havárie a převládajícímu větru, který po dobu tří týdnů od počátku foukal radioaktivní oblaka směrem k oceánu. Hlavními následky havárie jsou však společenské a ekonomické škody. Desetitisíce obyvatel postižené oblasti se stále ještě nemůže vrátit do svých domovů, a to i když už je více jak tři roky od havárie. Všech 54 jaderných bloků v Japonsku je odstaveno z provozu a země se potýká s nedostatkem elektrické energie.

Škodám, které vznikaly při havárii Fukushima-Daiichi a které byly zapříčiněny nevídanou přírodní katastrofou, se dalo zabránit. K tomu, aby se tato havárie v budoucnosti neopakovala, je nevyhnutné přijmout zvýšení bezpečnosti JE zohledněním rozšířeného spektra rizik, které vyplývají ze zřídkavých, ale stáje ještě možných událostí. Dále pak dobudováním bezpečnostních systémů, které zaručí požadovanou úroveň ochrany. Cílem je, aby v projektu JE bylo uvažováno s událostmi, které jsou nepředvídatelné a s velmi nízkou pravděpodobnosti výskytu, ale v dané lokalitě jsou představitelné. Týká se to hlavně iniciačních událostí, které můžou vést k nezvratnému procesu degradace, kde se při malém zvýšení závažnosti, neúměrně zvyšují následky.

4.1 Úkoly při tvorbě nové jaderné bezpečnosti

Nová jaderná bezpečnost může být charakterizována takto:

- je založená na stávající jaderné bezpečnosti. Rozšiřuje se základní projekt JE zahrnutím zřídkavých, ale ještě věrohodných událostí. Zaměřuje se hlavně na vnitřní a externí nebezpečí ve všech provozních režimech a na události nezvratitelného procesu degradace, které při malé změně závažnosti vedou k neúměrnému nárůstu následků. Přijímají se opatření na jejich zmírnění a na základě hodnocení rizik. Cílem je přijetí přiměřených a praktických opatření vedoucích k potlačení věrohodných událostí, které nebyly celkově zahrnuty v projektu JE;

- jde nad rámec současných požadavků regulačních orgánů. Zodpovědnost za ochranu zdraví a majetku obyvatel, musí přesahovat v současné době platné regulační požadavky kladené na projektanty a provozovatele JE;
- musí být přijata globálně. Existují rozdílné přístupy přijímání standardů v různých národních a regulačních podmínkách, ale realitou zůstává, že životaschopnost jaderné energetiky je globální problém a bezpečnostní principy musí platit pro všechny JE na světě.

Zároveň však je potřeba umožnit, aby se zainteresované strany mohly dohodnout na kritických oblastech, které by měly být řešeny. Některé kritické otázky k řešení jsou:

- stanovení rozsahu rozšíření základního projektu JE;
- stanovení velikosti přijatelného rizika pro použití pravděpodobnostních metod pro projektování a provoz reaktorů;
- jaké metody na podporu bezpečnosti, by měly být použity pro udržení konfigurace všech elektráren na světě vzhledem k rozdílům, které jsou mezi provozovateli JE a inženýrským teamem dodavatelů reaktorů;
- jak by regulační orgány měly vyvíjet technický základ pro aktualizaci oblasti ohrožení;
- jak by světový jaderný průmysl měl podpořit rozvoj racionálnějších a lépe pochopitelných přístupů k vlivům nízko-aktivní radiace, včetně posouzení vhodnosti použití lineárního bezprahového přístupu na základě vědeckých poznatků z poslední doby;
- jak by jaderný průmysl měl celosvětově aplikovat novou jadernou bezpečnost v elektrárnách, které jsou již provozovány, nebo jsou budovány, popřípadě ve fázi návrhu;
- jak bude světový jaderný průmysl určovat roli různých zúčastněných stran, včetně regulačních orgánů, výrobců a dodavatelů reaktorů, provozovatelů a majitelů, národních průmyslových organizací, organizací pro vývoj standardů a dalších mezinárodních organizací jako je MAAE, NEA, atd.

Havárie JE Fukushima-Daiichi způsobila prověření bezpečnosti JE z hlediska závažných vnějších událostí. Globální odezva na tuto havárii bude mít trvalý vliv jak na provoz stávajících elektráren, tak i na výstavbu nových.

Důležitost reakce společnosti na přírodní události a průmyslové havárie, bez ohledu na příčiny, není možno dostatečně zdůrazňovat. Velký potenciální vliv na společnost vyžaduje, aby konstrukce bezpečnosti byla podstatná v ochranných činnostech a celkové odezvě, včetně řešení hlavní role, kterou má komunikace při interpretaci bezpečnosti a sociálních dopadů havárie na veřejnost. V konkrétním případě jaderné energetiky není řešení následků havárie konečným cílem. Výhody nové konstrukce bezpečnosti obsahují lepší sociálně-politické a ekonomické faktory, které jsou důležité pro pokračování a růst jaderné energetiky na celém světě.

5 Vyřazování jaderných elektráren z provozu

Vyřazení JE z provozu, probíhá podle předem připravené a schválené koncepce, která zahrnuje dekontaminaci, demontáž, demolici, jakož i úpravu, skladování, přepravu a zneškodnění odpadů. Předpokládaný způsob vyřazení jaderné elektrárny z provozu (vyřazování jednorázové, postupné, s demontáží, bez demontáže, ochranné uzavření apod.) pak musí být každých pět let aktualizován během provozu jaderné elektrárny. Běžně se předpokládá, že v první fázi budou z jaderné elektrárny odstraněny ozářené jaderné materiály, především vyhořelé palivo, a aktivované materiály, mezi něž patří vnitřní části reaktoru, tlaková nádoba, zařízení primárního okruhu apod. Na to pak již mohou navázat běžné demoliční postupy. Bezpečné ukončení provozu JE a její vyřazení z provozu je náročný proces, a to jak po odborné stránce, tak i po stránce finančních nákladů. Ty mohou představovat až desítky procent původních investičních nákladů elektrárny.

Cíle při vyřazování jaderných elektráren z provozu jsou dva. Jedním je likvidace těchto zařízení, které zpravidla dosáhly vrcholu své životnosti, i když po havárii jaderné elektrárny Fukushima – Daiichi, se některé země rozhodly k předčasnému odstavení jaderných elektráren. A to způsobem, který nebude představovat neakceptovatelnou míru rizika pro obyvatelstvo, pracovníky, kteří pracují na likvidaci zařízení nebo pro životní prostředí. Druhým cílem je uvést lokalitu po odstranění jaderně energetického zařízení do stavu, kdy může být využita k jiným účelům.

V polovině roku 2013 bylo celosvětově 16 reaktorů odstaveno a plně demontováno, 50 reaktorů v procesu demontáže, 60 reaktorů ve stavu bezpečného odstavení a zakonzervováno, 3 reaktory uzavřeny v ochranném sarkofágu, 18 reaktorů nemělo schválenou strategii vyřazení a likvidace.

Co se týče priorit při odstavování jaderně energetických zařízení z provozu, tak IAEA stanovila priority na přípravu podporu používání mezinárodně odsouhlasených bezpečnostních standardů pro vyřazování, podporu vzniku politiky související s vyřazováním zdrojů na národní úrovni a s tím i související strategii vyřazování těchto zdrojů v každé zemi, kde dochází k využívání jaderné energetiky a podněcování vzniku těchto strategií v dostatečném předstihu. Rovněž důležité je podporovat a iniciovat spolupráci v oblasti vyřazování jaderně energetických zařízení z provozu na mezinárodní úrovni s účelem sdílení zkušeností, včetně znalostí získaných při zvládání a likvidace následků havárií.

Závěry a doporučení

Jaderné elektrárny a elektrárny spalující uhlí a zemní plyn jsou optimální zdroje energie v základním zatížení denního diagramu zatížení, protože jsou projektované tak, aby mohly být provozovány na plný výkon po dlouhou dobu. Bez těchto zdrojů není a ani v budoucnosti nebude jednoduché zajistit spolehlivé dodávky sítě v základním zatížení denního diagramu. Obnovitelné zdroje

energie, např. solární a větrné, jsou z pohledu přenosové sítě nespolehlivé zdroje energie. Když slunce nesvítí anebo je zahalené v oblacích, solární elektrárny negenerují energii. Když vítr nefouká, nebo fouká menší než optimální rychlostí, větrné elektrárny nepracují nejlépe. Tento problém by vyřešil systém akumulace energie ze solárních a větrných elektráren, který je v z pohledu masového komerčního využití, stále ve stadiu vývoje.

Obnovitelné zdroje, i jaderné technologie pokračují ve vývoji a můžou se vzájemně výhodně doplňovat při výrobě a dodávkách el. energie do přenosové sítě. Bez jaderných elektráren nebude možno splnit ambiciózní plán EU, nazvaný Energy Roadmap 2050, který počítá s tím, že do roku 2050 se bude elektrická energie v zemích EU vyrábět z 80% v bezuhlíkatých zdrojích. Svět může koncem století vyrábět velkou část své elektřiny z těchto zdrojů. Jaderná energie při uvažovaní v ještě delším období, může nakonec sloužit jako přemosťující technologie před přechodem na plně obnovitelné zdroje energie budoucnosti.

Z hlediska budoucnosti jaderné energetiky v tomto století a na základě již zmiňovaných faktů a úvah, se dá očekávat, že skladba jaderně energetických zdrojů se bude vyvíjet následovně. V období **do roku 2035** bude elektrická energie vyráběna v jaderně energetických zdrojích s reaktory Generace III., případně Generace III+. Po tomto datu, tedy zhruba **po roce 2035 a až do roku 2075**budou s velkou mírou pravděpodobnosti tvořit výrobní základnu jaderných elektráren, reaktory Generace III., Generace III+ a společně s pomalu nastupujícími reaktory Generace IV. V následujícím období **po roce 2075** lze očekávat, že ve skladbě výrobních zdrojů budou převážně reaktory Generace IV, v malém rozsahu doplněné o dožívající reaktory Generace III. resp. Generace III+.

Jaderná energie může mít rozsáhlé využití v mnohých zemích v průběhu několika století, pokud lidstvo zůstane při jejím mírovém využití. Je však potřebné věnovat náležitou pozornost bezpečnosti JE. Z pohledu jaderných havárií (TMI, Černobyl a Fukushima-Daiichi) existuje jasná a kritická potřeba posilnit celosvětový dozor nad jadernou bezpečností. Následky jaderné havárie nezůstávají na území jednoho státu, ale rozšíří se do celého světa.

Příklady úspěšného mezinárodního a celosvětového dozoru můžeme najít v mnohých průmyslových odvětvích. Dobrým příkladem je letecká doprava a letecký průmysl, které můžou poskytnout použitelné modely pro aplikaci v jaderné energetice. Existuje mnoho společných prvků s jadernou energetikou ve formě konkurenčních projektantů, výrobců a provozovatelů, z nichž všichni působí pod národním orgánem dozoru. Přičemž na vše ještě dohlíží účinný mezinárodní dozor.

Letecký průmysl využívá mezinárodní certifikační normy za účelem zajištění letové způsobilosti, jako i protokoly pro navigační systémy, atd. Dle mého názoru, jako autora této práce je zapotřebí zajistit v jaderné energetice následující:

- akceptování jaderné energie širokou veřejností;

- přijetí mezinárodních norem;
- mezinárodní dozor nad jadernou bezpečností;
- mezinárodní akceptace projektů JE;
- analýzy bezpečnosti provozu podle mezinárodních norem;
- řízení lidských zdrojů podle mezinárodních norem;
- havarijní plánování podle mezinárodních norem;
- výměna vědeckých informací a provozních zkušeností.

Pod dohledem mezinárodního dozoru by se měla uskutečnit výměna vědeckých informací a provozních zkušeností tak, aby tyto zkušenosti a informace byly přístupné všem JE a postupně byly implementovány do provozu a provozních předpisů.

Finanční prostředky

Jednotlivé státy, které provozují JE, by měly zabezpečit takové mechanismy financování, které zajišťují striktní dodržování všech mezinárodních norem.

6 Přínos práce a výsledky

Tato práce přináší souhrnný pohled na vývoj a využití jaderně energetických zdrojů z pohledu dodávek do elektrizační soustavy v různých odběrových režimech, porovnává tyto zdroje s dalšími možnými zdroji el. Energie, hlavně s tzv. obnovitelnými zdroji el. energie, které se vhodně doplňují a umožní v budoucnosti vyrábět elektrickou energii ve zdrojích, které budou minimálně zatěžovat životní prostředí. Dále tato práce obsahuje argumentaci, jak pracovat s veřejností a "od-démonizovat" tento ekologický a z dlouhodobého hlediska také ekonomický zdroj, od předsudků, které byly laické veřejnosti předkládány v souvislosti se závažnými haváriemi v jaderných elektrárnách. Sumarizuje cestu, jakou se jaderná bezpečnost ubírá, jak každá havárie díky získaným poznatkům a následným nastavení nových bezpečnostních opatření, snižuje dopady na okolí a hlavně nastavuje novou, vyšší úroveň testů, kontrol a bezpečnostních procedur jaderně-energetických zařízení v celosvětovém měřítku. Investiční náklady jaderných elektráren všeobecně tvoří 43 – 70 % celkové výrobní ceny elektřiny. V porovnání s 26 – 48 % u uhelných elektráren a 13 – 32 % u plynových je to podstatná část výrobní ceny elektrické energie vyrobené v těchto zdrojích. Většina těchto nákladů vzniká v průběhu výstavby JE. [9] Snížení investičních nákladů je proto významným faktorem pro zajištění konkurenceschopnosti jaderných elektráren. Významným faktorem, který umožňuje dosažení tohoto cíle je realizace opakovaných projektů JE. Níže jsou uvedeny jednotlivé etapy přípravy a realizace projektů JE s přihlédnutím na specifické aspekty, které umožňují dosažení snížení nákladů.

6.1 Licenční proces

Jaderné technologie dosáhly vysokého standardu a náklady na implementace bezpečnostních opatření tvoří významnou část výrobní ceny elektřiny. Pro dosažení vytyčených cílů je zapotřebí dobrá komunikace, spolupráce a koordinace mezi dozornými orgány, vlastníkem elektrárny a dalšími organizacemi, které se podílí na výstavbě JE. [9] Zkušenosti z jednotlivých projektů JE ukazují, že jasné definování relevantních požadavků ze strany orgánu dozoru ve stadiu projektování, významně napomáhá ke snížení doby výstavby a tím i ceny.

Jako příklad lze uvést následující JE:

Qinshan

Vliv požadavků orgánů dozoru v průběhu licenčního procesu byl minimalizován, protože vylepšení projektu byly vlastníkem identifikované ještě v období předkontraktačních jednání a následně byly zahrnuty do projektu JE.

Kashiwazaki – Kariwa

Před podáním žádosti o vydání stavebního povolení byl již ukončen projekt realizace a výběr dodavatelů začal okamžitě po vydání stavebního povolení.

Ling – Ao

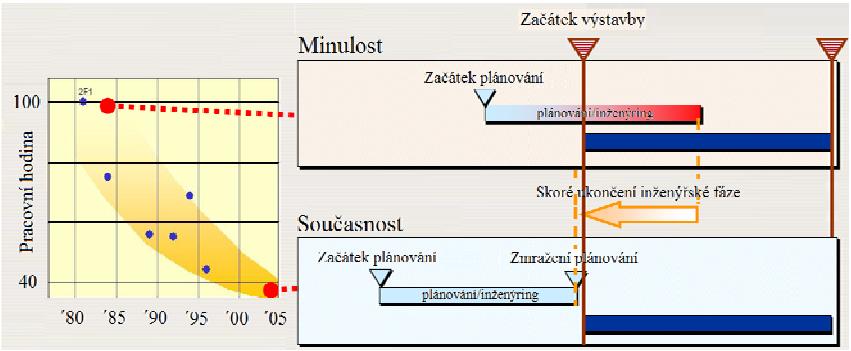
Protože projekt byl až na několik změn, opakováním projektu JE Daya Bay, bylo posuzování projektu orgány dozoru, zaměřené jen na provedené modifikace. V částech, kde byly oba projekty shodné, použily orgány dozoru závěry z posuzování projektu Daya Bay.

Při přípravě a realizaci opakovaných projektů, je však zapotřebí vzít v úvahu doporučení MAAE [10], podle kterého i v případě, že podobný projekt byl schválen v jiném státě, příslušný národní orgán dozoru, by měl vypracovat své vlastní a nezávislé posouzení. Na první pohled by se mohlo zdát, že licencování podobného projektu v různých státech by mohlo být jednodušší, ale je však zapotřebí vzít v potaz následující skutečnosti:

- bezpečnostní požadavky, aplikované v původním projektu, nemusí být identické s požadavky licenčního procesu v dané zemi,
- národní povolovací rámec dané země, včetně legislativy a nezávislého orgánu dozoru, ještě nemusí být plně vybudován – řešením v takovémto případě může být aplikování požadavků orgánů dozoru země, odkud pochází původní projekt,
- změny licenčních požadavků, které nejsou zohledněny v původním projektu.

6.2 Projektová příprava

Nezanedbatelnou položkou ceny jaderné elektrárny tvoří náklady na projekt. Na základě analýzy z výstavby vícerých JE je možno konstatovat, že tyto projektové náklady tvoří 6 – 10 % celkových investičních nákladů. Standardizací projektu je pak možno tyto náklady snížit na 3,5 – 4 %. Dalším aspektem, který v konečném důsledku znamená snížení investičních nákladů, je samotné řízení projektu. Precizně definovaný vztah mezi vlastníkem (investorem) a zhotovitelem, založený na využití zkušeností z předcházejících projektů je klíčovým prvkem úspěšného a efektivního řízení projektu.



Obr. 7.1 Redukce množství pracovních hodin předčasným plánováním [11]

Mimo již uvedeného, ke snížení ceny výstavby JE pomáhají i následující aspekty:

- využití zkušeností (zpětná vazba) při přípravě a realizaci projektu JE,
- využívaní 3D modelu k projektování výstavby a jeho spojení s tzv. 6D databází, která pro optimalizaci, zjednodušení a urychlení výstavby JE používá spojeného plánování 3D modelu s dodávkami materiálů, plánováním zdrojů a časů,
- používání pokročilých metod svařování za použití svařovacích automatů,
- minimalizace počtu změn schválené projektové dokumentace,
- ukončení procesu projektování ještě před začátkem výstavby.

Obr. 7.2 Plánování s 6D modelem [11]

Pro etapu projektování "opakované" JE, je však potřebné upozornit na:

- změny projektu z důvodů změny požadavků orgánů dozoru,
- změny projektu z důvodů specifických podmínek v místě výstavby.

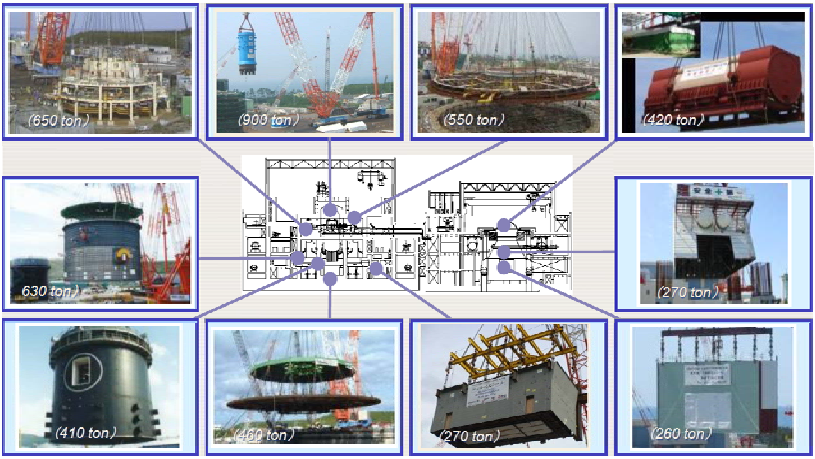
Dle materiálu MAAE z 03/2014 (Lessons Learned From Past NPP Construction Technology / Management) ukončení projektové přípravy před započetím výstavby, může snížit požadavky na pracovní sílu v období výstavby až na 40 %

6.3 Realizace projektu a provoz JE

Výhody "opakovaných" projektů v etapě realizace a provozu JE je možno shrnout do následujících bodů:

- standartní typy komponentů a systémů - s využitím modulů stavebních a technologických prvků,
- standartní technologické procesy a postupy,
- 6D databáze spojující 3D modelování s kapacitním plánováním dodávek materiálů, plánováním zdrojů a to vše v reálném čase výstavby,
- standartní provozní předpisy a postupy pro údržbu,

- snížení zásob náhradních dílů,
- souběh paralelních pracovních činností, plynulost výstavby, z čehož plyne zkrácení doby potřebné na výstavbu,
- snížení počtu pracovníků na stavbě.



Obr. 7.3 Redukce prací při konstrukci - modularizační metoda [11]

Náklady na vyřazování z provozu nejsou součástí této analýzy. Tyto náklady jsou silně ovlivněny strategií vyřazování, kterou mají jednotlivé země, využívající JE, aplikovanou. Jsou však i země, kde tato strategie vyřazování ještě ani není definována.

Seznam literatury

[1] Ferguson, Ch. D.: Nuclear Energy, What Everyone Needs to Know, Oxford University Press, New York, 2011, ISBN 978-0-19-975946-0

[2] Nuclear Energy in the 21th Century, The World Nuclear University Primer**,** World Nuclear Association 2006**,** ISBN 0-12-373622-6

[3] Word Energy Outlook 2004, OECD International Energy Agency, Paris 2004, ISBN 92-64-10817-3

[4] Energy for Tomorrow's World – Acting Now! World Energy Council, London 2000, ISBN 1-901640-06-X

[5] Global Energy Perspectives, Ed. Nakicenovic, Gruber & McDonald for World Energy Council & IIASA, Cambridge University Press 1998, ISBN 0-521-64569-7

[6] Radioactive Waste Management in Perspective, OECD Nuclear Energy AgencyParis 1996, ISBN 92-64-14692-X

[7] Radiation in Perspective: Applications, Risks and Protection, OECD Nuclear Energy Agency Paris 1997, ISBN 92-64-15483-3

[8] World energy perspective: nuclear power after Fukushima, 2012, World energy council

[9] IAEA, TECDOC-1390, Construction and Commissioning experience of evolutionary water cooled nuclear power plants, April 2004

[10] Considerations to Launch a Nuclear Power Programme, IAEA, Vienna, 2007

[11] Moore, J.: NPP Construction Activities, Nuclear Power Division, IAEA, March 2013

Publikace autora příbuzné k tématu dizertační práce

[1] ADF26 Janíček, F., Špok, M. a kol.: Liberalizovaný trh s elektrinou vo vybraných štátoch Európskej únie. In: EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie. - ISSN 1335-2547. - Roč. 16, mimoriadne č. : ELOSYS. Trenčín, 5.-8.10.2010 (2010), s. 208-213

[2] AFC74 Hlaváč, P., Špok, M., a kol.: Full scope risk monitor for the transmission grid. In: Electric Power Engineering 2014 : Proceedings of the 15th International scientific conference on Electric power engineering (EPE); Brno, Czech Republic, 12.-14. May 2014. - : Brno University of Technology, 2014. - ISBN 978-1-4799-3806-3. - S. 63-68

[3] AFD194 Janíček, F., Špok, M., a kol.: Controlled Switching with Surge Limiter and Without Surge Limiter Modelled by ATP Software. - , 2010. In: Power Engineering 2010. International Scientific Event. - Bratislava : STU v Bratislave. - Power Engineering 2010. Energy, Ecology, Economy : 9th International Scientific Conference. Tatranské Matliare, Slovakia, 18.-20.5. 2010. - Bratislava : STU v Bratislave, 2010. - ISBN 978-80-89402-23-6, CD-ROM

[4] AFD203 Janíček, F., Špok, M., a kol.: Má Slovensko a Česká republika rovnaký model trhu s elektrinou? In: Power Engineering 2010. International Scientific Event. - Bratislava : STU v Bratislave. - Power Engineering 2010. Energy, Ecology, Economy : 9th International Scientific Conference. Tatranské Matliare, Slovakia, 18.-20.5. 2010. - Bratislava : STU v Bratislave, 2010. - ISBN 978-80-89402-23-6, CD-Rom

[5] AFD308 Kubala, M., Špok, M., a kol.: Establishment of a Local Power Distribution System under Slovak Energy Legislation. In: Energetika - ekológia - ekonomika : 8. celoštátna konferencia s medzinárodnou účasťou. Vysoké Tatry - Nový Smokovec, 27.-29.5.2009. - Bratislava : STU v Bratislave, 2009. - ISBN 978-80-89402-08-3. - CD-Rom

[6] AFD309 Kubala, M., Špok, M., a kol.: Local Power Distribution System and Slovak Energy Legislation. In: ELITECH `09 : 11th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 25.5.2009. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2009. - ISBN 978-80-227-3091-4. - CD-Rom

[7] AFD535 Tomiš, I., Špok, M., a kol.: Current State of Photovoltaics in the World and Its Future in Slovakia. In: Energetika - ekológia - ekonomika : 8. celoštátna konferencia s medzinárodnou účasťou. Vysoké Tatry - Nový Smokovec, 27.-29.5.2009. - Bratislava : STU v Bratislave, 2009. - ISBN 978-80-89402-08-3. - CD-Rom

[8] BEC1 Janíček, F., Špok, M., a kol.: Energetická politika v podmienkach prijatia zákona o obnoviteľných zdrojoch energie. In: Energomatika 2009 : Mezinárodní odborná a vědecká konference. Praha, Czech Republic, 9.-10.9.2009. - Praha : Technologies & Prosperity, 2009. - ISBN 978-80-87205-09-9. - CD-Rom