

## Předmluva

Československá odborná sekce IEEE PES (The Institute of Electrical and Electronics Engineers - Power & Energy Society viz [www.ieee.org/](http://www.ieee.org/)) poskytla odbornou garanci pro tuto knihu **Řízení a stabilita elektrizační soustavy**. Publikace obsahuje detailní popis a analýzu provozu ES z hlediska praxe.

Knih je určena všem odborníkům v elektroenergetice a odpovídá základnímu poslání společnosti IEEE PES - být předním poskytovatelem vědeckých informací o elektrické energii a jejím využití pro zlepšení společnosti a zlepšovat profesní rozvoj našich členů.

IEEE vydává vlastní publikace, pořádá konference a formou technické podpory garantuje další rozvoj jednotlivých odborných oblastí.

Tato publikace přináší nejen ucelený popis elektrizačních soustav včetně jejich řízení, ale i analytické metody používané pro vyšetřování a zajišťování bezpečnosti provozu. Tím se tato kniha výrazně odlišuje nejen od knih encyklopedického charakteru, ale i od jednoúčelově zaměřených vysokoškolských učebních textů.

Dílo, které ve srozumitelné formě seznamuje čtenáře s historií a novými poznatky celého odvětví elektroenergetiky i jejich jednotlivých oborů, vznikalo od roku 2008 a podílela se na něm řada předních českých odborníků.

Život moderní společnosti je zcela zásadním způsobem ovlivňován provozem velkých elektrizačních soustav. Proto všichni očekávají od elektroenergetiků bezpečné provozování soustav a spolehlivé zásobování elektřinou. Takový provoz ale není samozřejmostí a musí být zajišťován koordinovaným úsilím provozovatelů jednotlivých soustav.

Po roce 2000 i ve vyspělých státech začalo docházet k mimořádným událostem s velkými ekonomickými dopady. Trh s elektrickou energií změnil legislativní rámec a v konečném důsledku se tak změnil i provoz elektrizačních soustav.

Je úkolem odborníků aby tyto vlivy dokázali predikovat a včas upozornit na jejich důsledky. Kniha jim umožní pochopit jak teoretické zákonitosti provozu elektrizační soustavy, tak i praktické fyzikálně – technické souvislosti,

**Ivan Petruzela**

předseda Československé sekce IEEE –Power and Energy Society

# Prolog

Tato kniha se zabývá řízením a stabilitou elektrizační soustavy (ES) z hlediska nejvyšší úrovně přenosové soustavy. Ta zásadním způsobem ovlivňuje bezpečnost provozu soustavy jako celku a tím i spolehlivé zásobování elektřinou, bez něhož si život moderní společnosti nelze představit.

Problematikou bezpečnosti a spolehlivosti provozu ES se zabývala řada časopiseckých článků i příspěvků na odborných konferencích, ale ucelená publikace na toto téma dlouho u nás chyběla (na rozdíl třeba od Slovenska – kde vyšla řada zajímavých knih, viz např. [1] - [4] ). Publikační vakuum bylo v Čechách přerušeno až vydáním knihy Spolehlivost v elektroenergetice [5] , která obsahovala i kapitolu o bezpečnosti a mimořádných stavech v ES. Podrobný popis distribučních soustav byl podán v [6] . Dílo zabývající se detailním popisem a analýzou bezpečnosti provozu ES z hlediska praxe stále chybělo. Původní myšlenka vytvořit nejprve vysokoškolské skriptum zaměřené na analytické metody používané pro vyšetřování bezpečnosti provozu ES se v roce 2008 rozšířila na ucelený popis ES včetně jejího řízení. Podařilo se dát dohromady kompetentní kolektiv autorů schopných sdělit čtenáři jak své hluboké životní zkušenosti, tak i moderní poznatky

Knih je rozčleněna na čtyři části, jednotlivé kapitoly vytvořili následující autoři:

## 1. Úvod:

Ing. Miroslav Vrba CSc.,  
Ing. Pavel Švejnar  
Ing. Karel Máslo, CSc.

## 2. Popis ES:

Ing. Ladislav Haňka, CSc. (Parametry vedení a ochrany)  
Ing. Karel Máslo, CSc.

## 3. Analýza ES:

Ing. Jan Veleba (Chody sítě)  
Ing. Miloslava Chladová, CSc. a Ing. Josef Vokál (Zkratky)  
RNDr. Bohumil Sadecký, CSc. (Stavová estimace a optimalizace)  
Ing. Karel Máslo, CSc. (Dynamická stabilita)  
doc. Dr. Ing. Veleoslav Mach a Ing. Zdeněk Brettschneider, Ph.D. (Elmg. přechodné děje)

## 4. Systémové služby:

Ing. Karel Máslo, CSc.  
Ing. Zdeněk Hruška (Regulace napětí a jalových výkonů)

Na tvorbě textu se rovněž podíleli Ing. M. Pistora (Fotovoltaická elektrárna), Ing. M. Pokluda, Ph.D., Ing. M. Galetka, Ph.D., Ing. B. Podroužek (Regulace f a P) a Ing. R. Habrych (Regulace U a Q). Cennými připomínkami přispěl Ing. P. Neuman, CSc.

V úvodu se čtenář seznámí se základními charakteristikami vývoje a rozvoje elektrizační soustavy a mezinárodním kontextem propojených přenosových soustav. V druhé části jsou popsány nejdůležitější součásti ES. Popis je zaměřen na odvození parametrů pasivních prvků sítě (vedení a transformátory) pro výpočty chodů sítě a na popis zdrojů z hlediska matematických modelů potřebných pro výpočty zkratů a dynamické stability. Popis je doplněn o ochrany a automatiky, které ovlivňují chování ES a jejich znalost je potřebná pro pochopení principů řízení a stability ES. Popisná část je východiskem k třetí části knihy, která se zabývá analýzou ES a tvoří tak stěžejní část knihy. Čtenář se zde postupně seznámí s výpočty chodů sítě, zkratových proudů a dynamické stability. Výklad je doplněn výpočty stavové estimace důležité pro řízení ES v reálném čase a metodiku optimalizačních výpočtů. Poslední čtvrtá část se věnuje praktickým otázkám řízení ES – regulaci jak frekvence a předávaných výkonů, tak i napětí a jalových výkonů a také řízení při mimořádných stavech ES, související s plánem obrany proti šíření poruch a plánem obnovy po rozpadu soustavy. Vyvrcholením je pak popis průběhu velkých systémových poruch a jejich důsledků.

Knih je určena studentům a učitelům elektrotechnických škol, zaměstnancům elektrárenských, rozvodných, dodavatelských a inženýrských organizací, projektantům, pracovníkům v energetickém výzkumu a vývoji a všem zájemcům o perspektivní obor, kterým elektroenergetika bezpochyby je a bude. Věříme, že v knize lze najít zajímavá témata a odkazy k dalšímu studiu.

Recenzi provedli prof. Ing. Daniel Mayer, DrSc. ze Západočeské univerzity v Plzni a prof. Ing. Michal Kolcun, PhD. z Technické univerzity v Košicích, kterým tímto také děkují.

Knih vznikla s podporou Technologické platformy Udržitelná energetika ČR ([www.tpue.cz/](http://www.tpue.cz/)) a Asociace energetických manažerů ([www.aem.cz/](http://www.aem.cz/))

Za kolektiv autorů  
Ing. Karel Máslo, CSc.

# Obsah

Předmluva –	1
Prolog	2
1. Úvod	4
1.1. Uspořádání odvětví elektroenergetiky	4
1.2. Rozvoj ES	5
1.3. Organizace evropských provozovatelů přenosových soustav	7
2. Popis elektrizační soustavy	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.1. Základní charakteristiky a koncepty	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.1.1. Základní východiska popisu ES	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.2. Venkovní vedení, kabely a kompenzační prostředky (L. Haňka)	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.2.1. Odvození fázových parametrů venkovního vedení	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.2.2. Odvození složkových parametrů venkovního vedení	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.2.3. Nepříznivé vlivy netranspozice fázových vodičů venkovních vedení	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.2.4. Odvození složkových parametrů kabelů	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.2.5. Zatžitelnost venkovních vedení	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.2.6. Kompenzační prostředky	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.3. Transformátory	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.3.1. Transformátory s regulací fáze	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.3.2. UPFC	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.4. Synchronní stroje	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.4.1. Synchronní stroj s permanentními magnety a plno-výkonovým měničem	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.5. Budící systémy synchronních strojů	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.5.1. Dynamické modely budících souprav	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.5.2. Regulátor buzení	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.6. Primární pohony a zdroje energie	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.6.1. Parní turbína	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.6.2. Vodní turbína	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.6.3. Paroplynový cyklus	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.6.4. Vznětový motor s přepřehováním	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.6.5. Větrná turbína	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.6.6. Regulátor turbíny	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.6.7. Fotovoltaická elektrárna	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.7. Asynchronní stroje	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.7.1. Asynchronní motor s kotvou nakrátko	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.7.2. Asynchronní generátor napájený do rotoru frekvenčním měničem	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.8. Ochrany a automatiky	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.8.1. Nadproudové ochrany	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.8.2. Proudové rozdílové a srovnávací ochrany	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.8.3. Impedanční ochrany a automatiky	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.8.4. Zásady nastavování ochrany a automatik	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.8.5. Adaptivní ochrany s přizpůsobitelným nastavením a algoritmem	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3. Analýza ES	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.1. Ustálené stavy – výpočet chodu sítě	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.1.1. Uzlová admitanční matice	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.1.2. Chod sítě jako nelineární problém	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.1.3. Začlenění jalových mezí v PU uzlech pro řešení chodu sítě	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.1.4. Procedury pro vylepšení chodu numerických metod	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.1.5. Základní výstupy řešení chodu sítě	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.1.6. Výpočty distribučních faktorů	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.1.7. Výpočty výpadkových faktorů	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.2. Výpočty zkratů	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.2.1. Časový průběh a charakteristické hodnoty zkratových proudů	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.2.2. Analytické metody výpočtu zkratových proudů	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.2.3. Výpočet nesymetrických poruch	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.2.4. Výpočet zkratových proudů podle norem	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.3. Stavová estimace	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.3.1. Přehled funkcí estimátoru	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.3.2. Metoda statické estimace stavu	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.3.3. Detekce a identifikace hrubých chyb měření	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.3.4. Pozorovatelnost (estimovatelnost) a kritická měření	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.3.5. Verifikace topologie sítě	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.3.6. Váhové koeficienty	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.3.7. Synchronní měření fázorů napětí a proudů v estimaci	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.3.8. Dynamická estimace	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.3.9. Provozní požadavky na robustní estimátor	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.4. Optimalizace	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.4.1. Specifikace optimalizačních úloh	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.4.2. Analytické metody řešení	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.4.3. Evoluční algoritmy	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.5. Dynamická stabilita ES	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.5.1. Úhlová stabilita přechodná	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.5.2. Stabilita malých kyvů	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.5.3. Oscilační stabilita	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.5.4. Frekvenční stabilita	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.5.5. Napěťová stabilita	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.6. Elektromagnetické přechodné děje	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.6.1. Vlnové přechodné děje	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.6.2. Přechodné děje v obvodech se soustředěnými parametry	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.6.3. Ferrezonance	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4. Systémové služby	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4.1. Udržování výkonové rovnováhy – systémová služba provozovatele PS	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4.2. Regulace frekvence a činných výkonů	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4.3. Regulace napětí a jalových výkonů	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4.3.1. Principy řízení napětí v elektrizační soustavě ČR	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4.3.2. Hladinová regulace transformátorů	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4.3.3. Přínosy regulace U a Q	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4.4. Řízení soustavy při mimořádných stavech – spolehlivost ES	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4.4.1. Popis velkých systémových poruch na úrovni přenosových soustav	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4.4.2. Plán obrany proti šíření poruch	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4.4.3. Plán obnovy po poruše typu blackout	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>

# Úvod

## 1.1. Uspořádání odvětví elektroenergetiky

I když magnetické a elektrické úkazy byly známy již ve starověkém Řecku, za počátek elektroenergetiky se pokládá rok 1882, kdy byla uvedena do provozu první Edisonova elektrárna v Pearl Street v New Yorku na ostrově Manhattan. Dalšími vývojovými kroky byly Teslův vynález trojfázové elektrizační soustavy umožňující přechod od stejnosměrného ke střídavému proudu a nahrazení pístových parních strojů turbínami.

Revoluční povahu objevů technické využitelnosti elektřiny charakterizoval též Karel Marx v roce 1850 slovy: „Panování jejího veličenstva páry, které převrátilo svět v minulém století, končí. Na jejím místě stane nesrovnatelně revolučnější síla – elektrická jiskra.“

V českých zemích byla elektřina podle dochovaných zpráv poprvé použita v roce 1878, kdy si elektrické osvětlení pořídila Tkalcovna v Moravské Třebové a Továrna na kůže v Dřevěných Mlýnech u Jihlavy. Jednalo se o obloukové lampy napájené dynamy poháněné parními stroji. Osvětlení průmyslových závodů i veřejných prostranství bylo hlavním motivem pro zavádění elektřiny. Prvním divadlem s elektrickým osvětlením na evropském kontinentě bylo divadlo v Brně.

Veřejná prospěšnost elektřiny a vysoké investiční náklady do elektráren a sítí s dlouhou dobou umořování si vynutily účast veřejných institucí na elektrizaci. Nejprve to byla města, posléze okresy, stát i elektrizační družstva. Vedle závodních a městských elektráren vznikly u nás v prvním desetiletí 20. století tzv. přespolní elektrárny zásobující kromě měst i venkovské obce.

Nárůst poptávky po elektřině v prosperujících továrnách a městech k nám lákal zahraniční kapitál z Rakouska, Německa a na Slovensku z Maďarska. Tak byly postaveny např. elektrárny v Poříčí u Trutnova, Trmice u Ústí nad Labem, Oslavany u Brna.

Koncem první světové války začaly u nás vznikat elektrárenské společnosti za účasti veřejného kapitálu. Vznikla potřeba standardizace a právního řádu, který by řešil konflikty mezi elektrárenskými společnostmi a jednotlivci při výstavbě elektráren a sítí, řešil tarify a zajišťoval přiměřený zisk. První elektrizační zákon (O státní podpoře při zahájení soustavné elektrizace) byl zpracován a předložen již v roce 1914, byl však schválen až po první světové válce v roce 1919. Jeho hlavním mottem bylo, že soustavná elektrizace je veřejným zájmem. Zákon vytvořil všeužitečné elektrárenské společnosti za účasti veřejného i soukromého kapitálu, které měly značné úlevy na daních, měly právo vyvlastňovat pozemky pro stavbu vedení, dostávaly subvence ze státního elektrizačního fondu. Na druhé straně měly tyto podniky povinnost rozvíjet elektrifikaci měst a obcí, využívat vodní energie, prodávat elektřinu za státem schválené sazby na vymezeném území. Jejich hospodaření podléhalo kontrole státních dozorcích orgánů. Z čistého zisku se majitelům vyplácela dividenda ve výši 4 – 6 % vloženého kapitálu.

Některé všeužitečné podniky se soustřeďovaly na výrobu elektřiny a její prodej jiným, často pouze rozvodným podnikům. Tím historicky vzniklo dělení na výrobní a rozvodné podniky.

Za okupace došlo ke sloučení všeužitečných elektrárenských podniků do větších celků. Vznikly Východočeské elektrárny v Hradci Králové, Jihočeské elektrárny v Českých Budějovicích, do Ústředních elektráren byla převedena všechna vedení 100 kV i s rozvodnami a velkými elektrárnami.

Válečná výroba způsobila mezi lety 1939 a 1944 nárůst výroby elektřiny o 65 % při relativně malém (18 %) nárůstu instalovaného výkonu. Využití elektrárenských bloků se sice zdvojnásobilo, avšak na úkor zanedbávané údržby a přetěžování. Měděné vodiče byly vyměněny za železná lana a použity na zbrojní účely. K dalším negativním dopadům okupace se ještě řadu let po válce řadil nedostatek mladých techniků a inženýrů.

Období po roce 1945 bylo charakterizováno znárodněním elektrárenských podniků, centralizací řízení a plánování elektroenergetiky. Po etapě obnovy válkou poškozeného hospodářství včetně energetického nastala etapa budování jednotného elektroenergetického systému. V roce 1950 se propojily česká a moravskoslezská soustava, o dva roky později se ostravská oblast propojila se středním Slovenskem. Tím vznikla v rámci Československa jednotná elektrizační soustava.

Při výstavbě tepelných elektráren se postupně přecházelo na větší jednotkové výkony bloků, od 32 MW v elektrárně Komořany a Nováky, přes 50 MW v Hodoníně, Poříčí, Opatovicích, Tisové a Mělníce, po 100 MW v Tušimicích a Ledvicích. Na 100 MW bloky navázaly bloky 200 MW a koncem 70. let blok 500 MW

v elektrárně Mělník. Na linky 220 kV, které spojily Čechy, Moravu a Slovensko a propojily i československou soustavu s polskou a východoněmeckou, navázaly linky o napětí 400 kV.

V 80. letech byla zahájena výstavba jaderné elektrárny Dukovany a Temelín.

Politické a ekonomické změny na přelomu 80. a 90. let neminuly ani elektroenergetiku. Symbol centrálně řízené a státem vlastněné elektroenergetiky – České energetické závody byl rozdělen a částečně privatizován v obou vlnách kupónové privatizace. Vznikly samostatné regionální rozvodné společnosti prodávající elektřinu konečným zákazníkům, posílil segment nezávislých výrobců elektřiny a tepla konkurující elektrárnám ČEZu.

Během druhé poloviny 90. let probíhaly diskuse o nejvhodnějším modelu trhu s elektřinou. Od úvah o jediném vykupujícím („single buyer model“), přes volný přístup k sítím („open third party access“) byl nakonec přijat a v energetickém zákoně z roku 2000 kodifikován model umožňující postupně všem konečným zákazníkům zvolit si dodavatele – obchodníka s elektřinou. Legislativa Evropské unie pak směrnicemi a nařízeními dále formovala podobu elektroenergetického i plynárenského odvětví požadavky na oddělení provozovatelů sítí od výroby, obchodu a dodávky a určila pravidla pro mezinárodní obchodování.

Zatímco první dekáda třetího tisíciletí byla v Evropě ve znamení nastavování pravidel trhu a tržního uspořádání elektroenergetického odvětví a o nástupu elektřiny z podporovaných obnovitelných zdrojů energie, druhá dekáda bude o integraci trhů, harmonizaci pravidel (kodexů) a o inteligentnějších elektroenergetických soustavách a nástupu nových technologií. Pokračovat bude pronikání elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, snaha o dekarbonizaci zdrojů, zvyšování účinnosti celého řetězce systému zásobování elektřinou a efektivnosti při jejím užití. Nicméně, ať už se bude model trhu a způsoby obchodování s elektřinou vyvíjet jakkoli, fyzikální a technická podstata výroby, přepravy a užití elektřiny jako nejušlechtlejší formy energie zůstane stejná. A o tom zejména je tato kniha.

## 1.2. Rozvoj ES

Přenosová soustava jako subsystém elektrizační soustavy tvoří významný prvek v zásobování společností elektrickou energií a v mezinárodním obchodu s touto komoditou. Její schéma a dimenze jsou odvislé od nesoumísnosti lokalizace výroby (elektráren) a spotřebních oblastí (distribučních soustav).

Adekvátní a na základě systémových studií racionální rozvoj, obnova a údržba přenosové soustavy zcela ovlivňuje spolehlivost elektrizační soustavy jako celku. Naprostá většina systémových poruch, které způsobily rozsáhlé výpadky elektřiny, byly zapříčiněny právě počátečními výpadky na úrovni přenosové soustavy. Jejich ekonomické ztráty byly obrovské a většinou je, z důvodu zásahu do všech oblastí života, nebylo možno ani uspokojivě vyčíslit. Je „zlatým pravidlem“, že na těchto aktivitách provozovatele přenosové soustavy by se nemělo příliš šetřit.

Počátky výstavby v bývalém Československu sahají do padesátých let minulého století. Přejít od napěťové hladiny 110 kV na hladinu 220 kV byl prvním krokem k následné výstavbě soustavy tak, jak ji provozuje dnešní a.s. ČEPS. Vedení a rozvodny 220 kV byly postupně budovány v závislosti na výstavbě velkých zdrojů, jako jsou uhelné elektrárny Tisová a Tušimice či vodní elektrárna Orlík. Soustava 220 kV je provozována dodnes a stále zajišťuje značnou část přenosu elektřiny, a to i na mezinárodní úrovni. Její další provoz je tedy opodstatněný, a to i z důvodu, že je lépe použitelná (oproti soustavě 400 kV) při případné obnově provozu po poruše typu black out. Důvod tkví v podstatně menším nabíjecím výkonu této napěťové hladiny, a tedy lépe zvládnutelnými napěťovými poměry, které počátek obnovy soustavy doprovázejí.

Po určitých „soubojích“ mezi zastánci napěťové úrovně 220 kV a 400 kV zvítězila v šedesátých letech minulého století myšlenka rozvíjet přenosovou soustavu na napěťové hladině 400 kV. Dnes se ukazuje oprávněnost tohoto přechodu v plné míře. Výstavba velkých uhelných elektráren v západní části republiky a rozvoj průmyslu a městských aglomerací předurčily realizaci prvního vedení 400 kV z rozvodny Výškov až do slovenských Lemešan. V průběhu šedesátých a sedmdesátých let se pak postupně budovaly další přenosové magistrály v západovýchodním směru i příčné propojení na Moravě (z Nošovic do Sokolnic) a Slovensku (z Liptovské Mary do Ledvic). V provozu byla i většina mezistátních vedení 400 kV. Na počátku osmdesátých let byla soustava prakticky dobudována. Z dnešního hlediska téměř nepředstavitelný rozsah výstavby tisíce kilometrů vedení v relativně krátké době byl „umožněn“ neexistencí soukromého vlastnictví pozemků za socialismu.

Koncem sedmdesátých let se projevilo, že samotná „podélná“ vedení v české části republiky nevyhovují a systémové studie ukázaly na nutnost výstavby příčného propojení. Jeho první část souvisela se spolehlivostí

zásobování hl. m. Prahy, proto se zrealizovala střední část příčné spojky, a to vedení Čechy střed – Řeporyje. Její jižní část byla dobudována jako reakce na vyvedení výkonu JE Temelín. Vzhledem k výkonu této elektrárny a neadekvátní spotřebě Jihočeského kraje byla postavena jako dvojitě vedení. Severní část příčné spojky, vedení Čechy střed – Bezděčín, byla dokončena až po r. 1989 a ukončila tak tuto významnou stavbu podstatným způsobem zajišťující spolehlivost.

Výstavba JE Dukovany a vyvedení jejího výkonu na počátku osmdesátých let vyvolaly nutnost výstavby dvojitě vedení 400 kV Slavětice – Sokolnice a jednoduchého vedení 400 kV Slavětice – Čebín.

Významným momentem v rozvoji přenosové soustavy ČR před r. 1989 byl i obchod s elektřinou s tehdejší „západem“. V provozu byla pouze vedení do bývalých NDR, SSSR a dále do Polska a Maďarska. To bylo dáno importem elektřiny ze SSSR do jeho „satelitů“. Jediným obchodem se „západem“ byl export elektřiny do Švýcarska. Ten byl realizován vydělováním bloků 50 MW elektrárny Opatovice po vedeních 220 kV Opočinek, Sokolnice Rakousko (Bisamberg). Tím vznikaly tzv. vázané finanční prostředky pro nákup zařízení (hlavně vypínače).

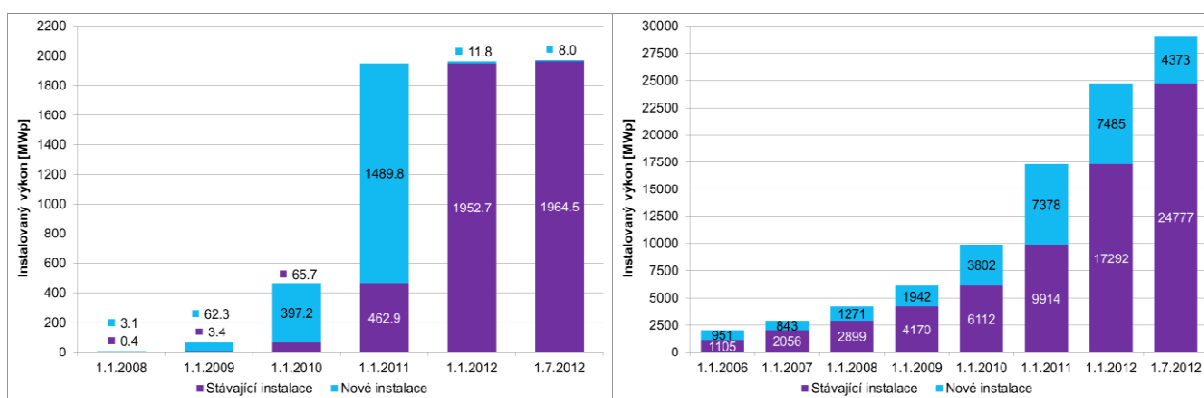
Přímý obchod se „západem“, bez nutnosti vydělovat bloky do ostrovního režimu, byl podmíněn výstavbou tzv. stejnosměrných spojek („Back to back station“). Tato zařízení umožňují propojit soustavy s odlišným systémem regulace frekvence tím, že se elektrický proud nejprve usměrní na stejnosměrný a ve stejném místě „rozvlní“ na střídavý. První stejnosměrná spojka byla vybudována začátkem osmdesátých let v rakouské rozvodně Dürnrrohr a byla propojena vedením 400 kV na dvojitých stožárech ze Slavetic. Tím byl umožněn export 400 MW z Československa do Rakouska. Druhá stejnosměrná spojka byla vybudována v bavorské rozvodně Etzenricht a napojena vedením 400 kV z rozvodny Hradec. Po připojení soustav ČR, Slovenska, Polska a Maďarska k systému UCPTÉ v polovině devadesátých let pozbyla tato zařízení smysl.

Připojení soustavy ČR k UCPTÉ v devadesátých letech zcela změnilo orientaci obchodu a provozu. Vznikly nové obchodní, paralelní a kruhové toky výkonu a zcela se změnil systém regulace frekvence a předávaných výkonů. Elektrizací a tedy i přenosová soustava musela vyhovět novým pravidlům provozu, která byla obsažena v tzv. Massnahmenkatalog (katalogu opatření).

Podrobněji se historií zabývá publikace [7] .

Další velkou změnou byl rozvoj obnovitelných zdrojů v Evropské unii, zejména větrných elektráren v severním a východním Německu, což zásadním způsobem ovlivňuje fungování přenosových sítí ve středoevropském regionu a velkými kruhovými toky ohrožuje i bezpečnost provozu ES (blíže viz [8] [12] .

Velkou výzvou pro řízení a stabilitu ES je i boom instalace fotovoltaických elektráren v Česku a Německu, jak dokládá následující obrázek:

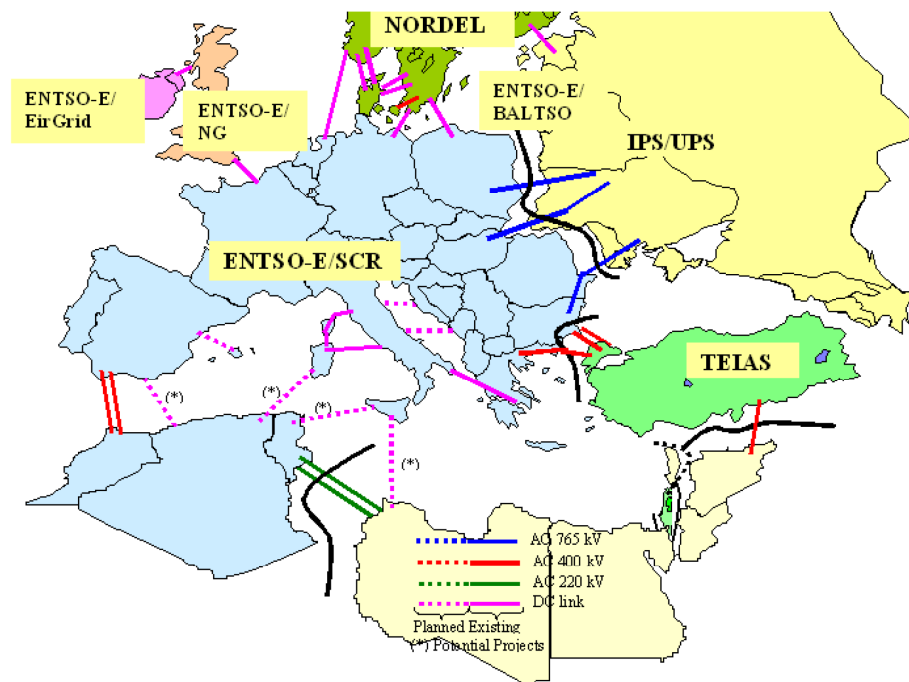


**Obr. 1.2-1 Vývoj instalovaného výkonu FvE v ČR a v Německu (upraveno podle [13] )**

Česko se tak dostalo v r. 2012 na páté místo v Evropě v instalaci FvE (po Německu, Itálii, Španělsku a Francii).

### 1.3. Organizace evropských provozovatelů přenosových soustav

Nová organizace provozovatelů přenosových soustav ENTSO-E vznikla na základě požadavků stanovených tzv. třetím energetickým balíčkem (viz [14]) sloučením předchozích organizací provozovatelů přenosových soustav UCTE (státy kontinentální Evropy), NORDEL (Norsko, Švédsko a Finsko), UKTSOA (Velká Británie), BALTSO (pobaltské státy) a ATSOI (obě Irsko) jak ukazuje následující obrázek.



**Obr. 1.3-1 Schéma propojení elektrizačních soustav v Evropě**

Světle modrá barva ukazuje tzv. kontinentální synchronní propojení (označované také zkratkou RGCE – „Regional Group Continental Europe“), které přes dva střídavé podmořské kabely sahá i do severní Afriky (Maroko, Alžírsko a Tunisko – další rozšiřování o Libyi bylo zastaveno po neúspěšných testech propojení). Turecko (v obrázku zelená barva) je nyní propojeno synchronně ve zkušebním provozu. Kontinentální propojení tak vlastně stalo interkontinentálním a zasahuje přes tři kontinenty.

Ve své misi si ENTSO-E stanovila tyto cíle:

- bezpečnost provozu - usilovat o spolehlivý a bezpečný provoz přenosových sítí,
- adekvátnost – podporovat rozvoj evropských sítí a investice do ES,
- trh – poskytovat rámec pro fungování konkurenčního a integrovaného trhu s elektřinou,
- udržitelnost – usnadňovat integraci nových, zvláště obnovitelných zdrojů pro omezení skleníkových plynů.

Aktivita ENTSO-E řídí (kromě obvyklých administrativních orgánů) čtyři stálé komise: pro rozvoj soustavy, řízení provozu, trh a výzkum a vývoj. V jejich rámci fungují jednotlivé pracovní a regionální skupiny.

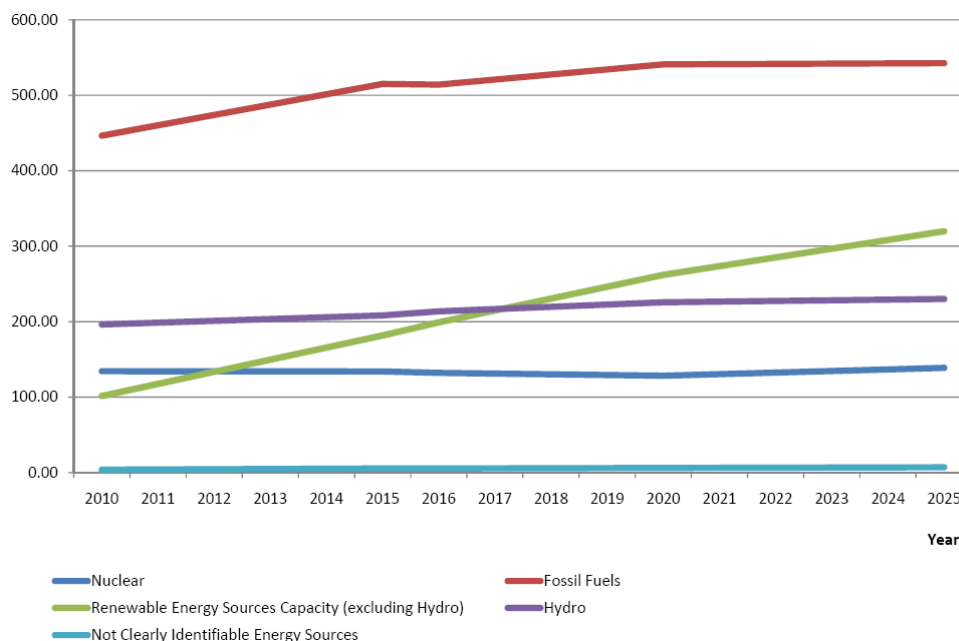
Například rozvojová komise zahrnuje následující pracovní skupiny: Plánovací standardy, Modelování sítí a data, Desetiletý rozvojový plán, Výzkum a vývoj, Adekvátnost a modely trhu, Správa majetku. Do kompetence výboru spadala i studie EWIS (<http://www.wind-integration.eu>) a koncept Supergrid 2050 (<http://www.friendsofthesupergrid.eu/>). Tento koncept se v rámci ENTSO-E transformoval do projektu e-Highways (<https://www.entsoe.eu/nc/system-development/2050-electricity-highways>).

K významným počínům ENTSO-E patří vydání tří dokumentů:

1. Předpověď adekvátnosti soustavy („System Adequacy Forecast 2010 – 2025,, -[15] )
2. Desetiletý rozvojový plán („Ten-Year Network Development Plan”-[16] )
3. Plán výzkumu a vývoje („Research and Development Roadmap“ - [17] ).

Adekvátnost elektrizační soustavy (ES) tvoří vedle bezpečnosti provozu důležitý aspekt spolehlivosti ES. Je to vlastnost ES pokrývat v každém okamžiku výkonovou rovnováhu mezi výrobou a spotřebou elektřiny. V tomto ohledu je velkou výzvou rostoucí podíl elektřiny z obnovitelných zdrojů energie (RES – „Renewable Energy Source“) patrný z Obr. 1.3-2. Větrné a fotovoltaické elektrárny se vyznačují proměnlivostí výroby

v závislosti na změnách rychlosti větru a intenzitě slunečního svitu. To bude klást zvýšené požadavky na regulovatelnost ES a zřejmě vyžadovat nové koncepce řízení frekvence a předávaných výkonů.



**Obr. 1.3-2 Predikce instalovaných výkonů [GW] v Evropě (zdroj ENTSO-E)**

Aktuální desetiletý rozvojový plán (aktualizuje se každé dva roky) zahrnuje okolo 500 projektů investic do infrastruktury sítí- Tyto investice jsou nezbytné pro:

- vyvedení obnovitelných zdrojů energie (s cílem dosáhnout 20% podílu na celkové spotřebě<sup>1</sup>),
- umožnění volného trhu s elektřinou,
- zajištění bezpečnosti dodávek a spolehlivosti soustavy pro 525 milionů obyvatel Evropy.

Plán výzkumu a vývoje je motivován požadavky tzv. třetího energetického balíčku, konkrétně Směrnice („Directive“) EC/72/09 a Nařízení („Regulation“) 714/09. Pro splnění těchto požadavků si ENTSO-E stanovila tyto čtyři cíle:

1. Identifikovat architekturu sítě schopnou vyvést výrobu z obnovitelných zdrojů (větrné parky a solární elektrárny na Saharě) v horizontu r. 2020 a přenášet jejich výkony přes celou Evropu,
2. podporovat moderní prostředky jako WAMS („Wide Area Monitoring System“), FACTS („Flexible AC Transmission System“), vysokonapětové stejnosměrné přenosy HVDC („High Voltage Direct Current“),
3. navrhnout a ověřit nové metody monitorování a řízení panevropské ES, např. jak bezpečně pokrýt výpadky větrných elektráren při bouřích nebo změny výkonu fotovoltaických elektráren při přechodu mraků,
4. vyvinout simulátory trhu, založené na tržních modelech („Market models“).

Tyto výzvy by měly být reflektovány jednotlivými provozovateli sítí tak, aby se nestaly překážkami v budoucí panevropské síti (v širším smyslu Evropské elektrizační soustavy).

Prioritní aktivitou ENTSO-E je tvorba nových síťových kodexů, které budou po schvalovacím procesu (blíže viz [18] ) legislativním základem pro odvětví elektroenergetiky na úrovni Evropské unie. Nejdále pokročil pilotní projekt Kodexu požadavků na generátory (RfG „Network code for requirements for grid connection applicable to all generators“), který byl zaslán k schválení na ACER<sup>2</sup>. Tento Kodex by měl být platný pro všechny zdroje od 800 W výš.

<sup>1</sup> Rozumí se na celoevropské úrovni pro všechny energie (nejen pro elektřinu). ČR si stanovila závazek 13%.

<sup>2</sup> The Agency for the Cooperation of Energy Regulators založená na základě Směrnice (EC) No 713/2009



## Literatura

- [1] M. Kolcun a kol.: Riadenie prevádzky ES, Mercury-Smékal, Bratislava 2002 (ISBN 80-89061-57-5)
- [2] M. Kolcun a kol.: Analýza elektrizačnej sústavy, TU Košice, 2005 (ISBN 80-89057-09-8)
- [3] M. Kolcun, V. Griger, L. Beňa, J. Rusnák: Prevádzka ES, TU Košice, 2007 (ISBN 978-80-8073-837-2)
- [4] M. Kolcun, L. Beňa: Využitie špecializovaných zariadení na reguláciu tokov výkonov v ES, , TU Košice, 2011 (ISBN 978-80-553-0767-1)
- [5] J. Tůma a kol.: Spolehlivost v elektroenergetice, CONTE spol. s r.o. a ČVUT Praha, (ISBN 80-239-6483-6)
- [6] Z. Hradílek: Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení, VŠB –TU Ostrava, 2008 (ISBN 978-80-7225-291-6)
- [7] M. Kubín: Proměny české energetiky, ČSZE 2009, (ISBN 978-80-254-4524-2)
- [8] K. Máslo, A. Kasembe: Security operation of transmission network- present time and future, 10th International Conference Electric Power Engineering, Dlouhé Stráně 2009, (ISBN 978-80-248-1947-1)
- [9] K. Máslo: Influence of wind farms on transmission system operation in the central Europe, 9th International Conference Control of Power Systems, 2010 Tatranské Matliare, (ISBN 978-80-89409-19-9)
- [10] K. Máslo: Vliv rozptýlené výroby na napěťové poměry v distribuční soustavě, Energetika č. 12/2010
- [11] K. Máslo M. Galetka: Security operation of transmission network- present time and future challenges, 12th International Conference Electric Power Engineering, Dlouhé Stráně 2011, (ISBN 978-80-248-2393-5)
- [12] M. Pistora, K. Máslo: Vliv frekvenčního nastavení OZE na ostrovní provoz v distribuční soustavě, sborník konference CIRED, Tábor 2012
- [13] Pistora M.: Voltage Control in Distribution Networks with Large Photovoltaic Power Plants; sborník konference POSTER 2012, Praha 2012
- [14] A. Kasembe, K. Máslo: Rozvoj přenosové soustavy ČR a zahraniční spolupráce, Energetika č. 10/2008
- [15] <https://www.entsoe.eu/resources/publications/system-development/adequacy-forecasts/>
- [16] <https://www.entsoe.eu/system-development/tyndp/tyndp-2012/>
- [17] <https://www.entsoe.eu/rd/entso-e-rd-roadmap/>
- [18] <https://www.entsoe.eu/resources/network-codes/>