

# 1. Hlavní prvky elektrizační soustavy

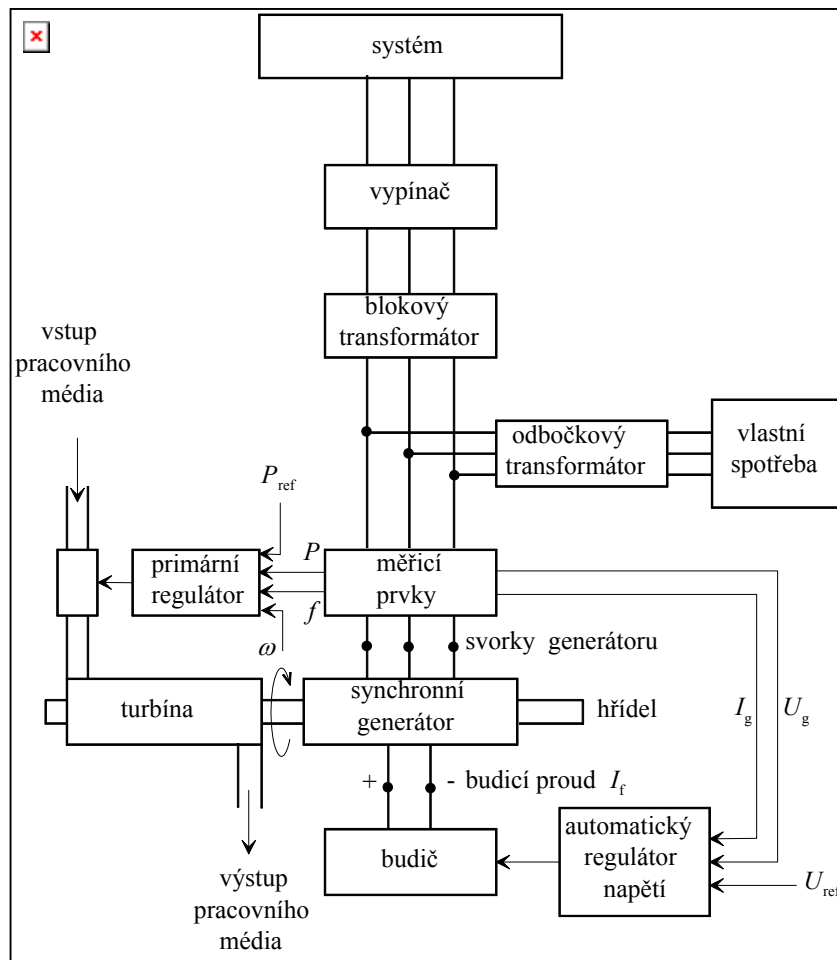
Každá elektrizační soustava musí být vyprojektována a vybudována tak, aby vyhověla následujícím požadavkům:

- **Spolehlivost dodávky elektrické energie** (její přerušení může vyvolat velké následné škody u odběratelů, ohrozit lidské životy a způsobit značné finanční ztráty). Potřebnou spolehlivost je nutno zajistit
  - vysokou kvalitou jednotlivých prvků systému,
  - dostatečnou rezervou ve výrobě energie,
  - bezpečností systému,
  - využíváním rozsáhlých sítí k zásobování odběratelů více cestami.
- **Dobrá kvalita dodávané energie.** Zde se hlavní požadavky soustředí na
  - udržování napětí na definovaných hladinách s minimálními fluktuacemi,
  - udržování kmitočtu na definované hladině s minimálními fluktuacemi,
  - nízký obsah harmonických.
- **Hospodárná výroba a rozvod.** Většina elektrické energie je doposud vyráběna přeměnou tepelné energie získané z fosilních paliv na energii mechanickou a poté elektrickou. Účinnost takové přeměny je ovšem malá, zejména v případě prvního kroku. Proto je třeba z hlediska účinnosti a nákladů optimalizovat náklady na výrobu a přenos. Jistých úspor lze dosáhnout i propojením a provozováním řady menších systémů jakožto systému velkého.
- **Dopad na životní prostředí.** Zásadou je co nejnižší znečištění vody a vzduchu při výrobě energie a co nejmenší zásahy do přírody při stavbě nových přenosových linek. Při zakládání tak rozsáhlých staveb se navíc již začíná uplatňovat veřejný konsensus, často i s možností politického dopadu. Energetické podniky jsou proto nuceny hledat nejprve další možnosti efektivního využívání stávajících zařízení (elektrárny, přenosové linky), poněvadž získat povolení ke stavbě nových je stále obtížnější a obtížnější.

## 1. 1. Výroba elektrické energie

Elektrická energie se zpravidla získává z energie mechanické. Mechanická energie se získává buď z energie tepelné, nebo z energie proudící vody. Mezi zdroje tepelné energie patří především uhlí, zemní plyn, olej a paliva jaderná. V současné době se stále více hledají i možnosti využití obnovitelných zdrojů (energie větru, přílivu, geotermální energie a také energie obsažená v biomase). Přeměna mechanické energie na elektrickou se v drtivé většině případů realizuje prostřednictvím synchronních generátorů, pouze při konverzi energie větru se užívají i generátory asynchronní.

Na obr. 1.1 je znázorněn blokový diagram výroby elektrické energie. Synchronní generátor je poháněn primárním mechanickým zařízením, zpravidla turbínou nebo dieselaagregátem. Toto zařízení je vybaveno regulátorem, jenž řídí jeho rychlost nebo dodávaný výkon v závislosti na nastavené kmitočtové charakteristice. Vyrobena elektrická energie se dodává do sítě přes zvyšovací transformátor. Dalšími důležitými prvky v této oblasti je budič, napěťový regulátor, měřicí, ovládací a pomocná zařízení, vlastní spotřeba včetně příslušných napájecích transformátorů a další.



Obr. 1.1: Blokové schéma výrobní jednotky s nejdůležitějšími prvky

## Synchronní generátory

Velmi volně je lze klasifikovat do dvou skupin: vysokorychlostní generátory (turbogenerátory) poháněné parními či plynovými turbínami a nízkorychlostní generátory poháněné vodními turbínami. Turbogenerátory mají zpravidla malý průměr rotujících částí (kvůli redukci odstředivých sil), velkou osovou délku a horizontální polohu. Typicky se používají dvojpólové a čtyřpólové stroje (v případě generátorů pro síť 50 Hz jsou otáčky 3000/min. nebo 1500/min.). Nízkootáčkové generátory mívají otáčky na úrovni 500/min. a nižší, odpovídající počet pólů, větší průměr a menší osovou délku.

Všechny typy generátorů mají pohyblivou a nepohyblivou část (stator a rotor) vyrobenou z magnetického materiálu. Vinutí statoru, jež napájí systém, je umístěno v drážkách rozmístěných ekvidistantně podél jeho vnitřního obvodu a sestává ze tří identických částí příslušejících jednotlivým fázím. Stejnoseměrné budicí vinutí turbogenerátorů je umístěno podobným způsobem v drážkách na rotoru, zatímco v případě nízkootáčkových strojů na jejich vyniklých pólech. Rotor je navíc vybaven tlumícím vinutím (amortizérem), jehož úkolem je tlumit mechanické kmitání rotoru. Toto vinutí je u turbogenerátorů tvořeno vodivými klíny v drážkách budicího vinutí, u nízkootáčkových generátorů se umísťuje do osových drážek v pólových nástavcích.

Stejnoseměrný budicí proud rotoru vyvolává ve stroji rotující magnetické pole, jehož intenzita je úměrná tomuto proudu. Vzniklý magnetický tok poté indukuje v každé ze tří fází statorového vinutí elektromotorickou sílu, v jejímž důsledku vzniklý proud a odpovídající výkon začne proudit do soustavy.

Proud protékající statorovým vinutím vytváří své vlastní magnetické pole, jež má konstantní velikost, ale otáčí se stejnou rychlostí jako rotor. Příslušný magnetický tok se superponuje s tokem vyvolaným budícím vinutím. Vzniklý výsledný tok má stacionární charakter vůči rotoru, ale otáčí se synchronní rychlostí vůči statoru. Důsledkem je to, že rotor může být masivní (neindukují se v něm vířivé proudy a nevznikají zde tedy ani odpovídající ztráty), zatímco stator musí být z opačných důvodů laminovaný.

Pokud se rychlost rotoru z nějakého důvodu odchýlí od rychlosti synchronní, nebude mít výsledný tok vůči rotoru stacionární charakter, což vyvolá vznik proudů především v tlumícím vinutí. Tyto proudy vyvolávají podle Lenzova pravidla tok opačného směru a brání tak změně synchronní rychlosti (a tedy oscilacím).

V dřívějších letech existoval univerzální trend zvyšovat jmenovitý výkon nově konstruovaných generátorů a elektráren, poněvadž poměrné investiční i provozní náklady s rostoucím výkonem jednotek klesají (nižší měrná hmotnost generátoru na jednotkový výkon, menší budovy, celková zástavba a vůbec všechna další potřebná zařízení ve stejném smyslu). V některých zemích se však v posledních letech objevuje i tendence opačná, zejména tam, kde je například přístup k levnému zemnímu plynu. Ve Velké Británii se tak budují a používají elektrárny s plynovými turbínami s kombinovaným cyklem pohánějí generátory do výkonu 250 MVA. Běžně se však ve světě užívají moderní synchronní generátory o výkonu 100 – 1300 MW a napětí 10 – 32 kV.

Generátory jsou k blokovému transformátoru připojeny v případě malých výkonů kabely, při větších výkonech stíněnými masivními vodiči.

### **Budiče a automatické regulátory napětí**

Budicí systém generátoru sestává z budiče a automatického regulátoru napětí. Výkon budiče tvoří zpravidla 0.2 – 0.8 % výkonu generátoru. Napětí budiče zpravidla nepřesahuje 1 kV, aby jeho vinutí nevyžadovalo dodatečnou izolaci.

Budiče lze dělit na rotační a statické. V případě *rotačních budičů* se budicí proud získává ze stejnosměrných generátorů nebo ze střídavých generátorů opatřených usměrňovači. Poněvadž stejnosměrné zdroje (dynamy) nedosahují potřebných výkonů, zapojují se do kaskády. To však vede ke zhoršování dynamiky budiče, projevující se ve zvýšení jeho ekvivalentní časové konstanty (budič reaguje daleko pomaleji na změny parametrů). Navíc se zde objevují problémy s komutací a proto nelze takové typy budičů užít v případě velkých generátorů vyžadujících značné budicí proudy.

V současné době byly proto díky pokroku v oblasti výkonové elektroniky tyto budicí systémy prakticky vytlačeny jednoduššími a spolehlivějšími střídavými stroji vybavenými levnými a výkonnými usměrňovači. Tak lze například využít reluktanční stroj pracující při kmitočtech kolem 500 Hz, takže získaný proud je dostatečně hladký. Nevýhodou je, že k rotorovému vinutí musí získaný proud přivádět přes kroužky a dále to, že budič je dosti velký.

Výhodnější zapojení sestává ze synchronního stroje na hlavním hřídeli s budícím vinutím na statoru a vinutím kotvy na rotoru. Střídavý proud indukovaný v rotorovém vinutí je usměrněn diodami připevněnými k rotoru a odtud je přímo napájeno rotorové vinutí synchronního alternátoru. Nevýhodou je zde skutečnost, že budicí proud lze řídit pouze nepřímou v budícím obvodu budiče, což vede ke zvýšení časové konstanty systému až o 1 s. Zkrátit ji lze tak, že se místo usměrňovacích diod použijí tyristory a řízení se provádí prostřednictvím změny jejich spínacího úhlu. Řízení spínacího úhlu rotujících tyristorů je ovšem složité a příslušný úhel může být ovlivněn i rozptylovým elektromagnetickým polem uvnitř generátoru.

Základem *statických budičích systémů* jsou tyristorové měniče přímo řízené napěťovým regulátorem. Jednotlivé systémy se liší způsobem napájení které lze realizovat přes transformátor buď z nezávislého zdroje nebo přímo z generátoru. Druhá možnost je ovšem nevýhod-

ná v případě, kdy dojde na svorkách alternátoru ke zkratu, což může vést ke ztrátě buzení. Tuto nevýhodu lze odstranit compoundací odvozenou z proudu generátoru, což ovšem představuje další náklady. Hlavní nevýhodou všech statických měničů je ovšem nutnost napájení rotorového vinutí budícím proudem přes kroužky. Ta je na druhé straně vyvážena velkou rychlostí, s jakou budicí obvod reaguje na změnu signálu. A poněvadž cena polovodičových měničů trvale klesá a jejich spolehlivost roste, stávají se statické budicí systémy nejužívanějšími zdroji buzení velkých generátorů.

### Automatické regulátory napětí

Tato zařízení regulují napětí na svorkách alternátorů změnami budicího proudu. Měřicí prvek nejprve snímá velikost proudu, napětí, výkonu a kmitočtu. Změřené napětí  $U_g$  jež je kompenzováno s ohledem na proud  $I_g$  je porovnáváno s referenčním napětím  $U_{ref}$ . Odchylka  $\Delta U$  je zesílena a použita k tomu, aby se změnil výkon budiče, což se projeví ve změně budicího proudu  $I_f$ . Tím se hodnota  $U_g$  změní tak, aby se odchylka  $\Delta U$  eliminovala. Uvedený způsob regulace představuje typickou uzavřenou smyčku. Regulační proces se stabilizuje negativní zpětnou vazbou odvozenou ze zesilovače.

Samozřejmě se jedná jen o hrubý popis. Uvedený regulátor obsahuje řadu dalších prvků, jež chrání jak samotný regulátor, tak i budič a alternátor vůči nadměrným napětím a proudům. Automatický regulátor napětí bývá též často doplněn stabilizérem, jenž dovoluje tlumení vlivem změn zátěže.

### Turbíny a jejich regulační systémy

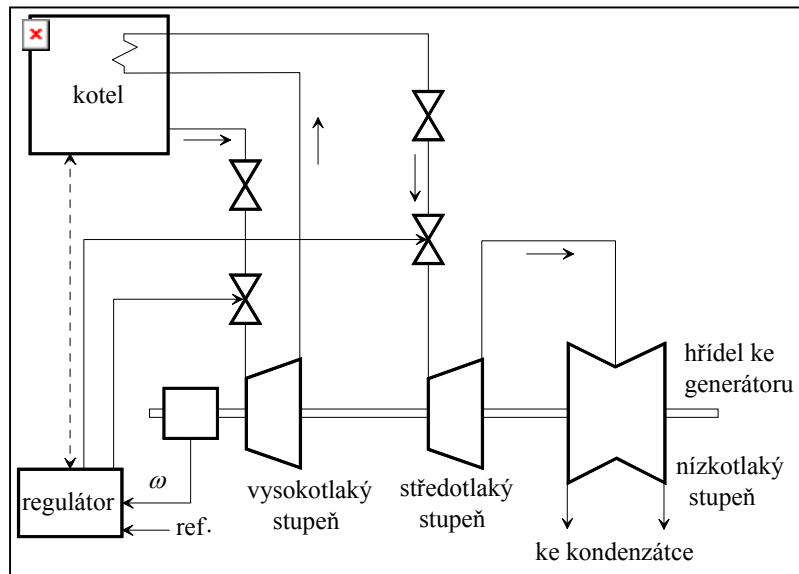
*Parní turbíny* se užívají v elektrárnách spalujících uhlí nebo olej a v elektrárnách jaderných. Pracují s vysokými teplotami a tlaky pracovního média. Každá turbína sestává z mnoha stacionárních a rotujících částí, jež jsou soustředěny do několika skupin či stupňů. Pára o vysokém tlaku nejprve vstoupí do stacionárních lopatek, je urychlena a nabude vyšší kinetickou energii tím, že se snižuje její tlak. Proud páry je pak veden do rotující části a dodává jí moment. Jak je tento proud veden v osovém směru turbíny, snižuje se její tlak a zvyšuje objem. Délka lopatek se ve směru proudění musí zvyšovat, aby se turbína vyrovnala s rostoucím objemem páry. Výkonová turbína může sestávat ze tří a více stupňů na společné hřídeli. Jak se pára vede z jednoho stupně do následujícího, je možno ji přihřívát a tím zvyšovat její entalpii. Výsledkem je zvýšení účinnosti parního procesu. Tepelná účinnost moderních parních turbín se pohybuje kolem 45 %.

Parní turbíny lze klasifikovat na turbíny bez přihřívání a s jednoduchým či dvojitým přihříváním. Turbíny bez přihřívání se používají u menších jednotek do výkonu 100 MW. Nejobvyklejší jsou turbíny s jednoduchým přihříváním a třemi stupni: vysokotlakým, středotlakým a nízkotlakým (obr. 1.2). Pára proudí z kotle přes hlavní bezpečnostní ventil a regulační ventil do vysokotlakého stupně. Po částečné expanzi se pára vede zpět do kotle, kde se přihřeje a zvýší se její entalpie. Odtud proudí přes další bezpečnostní a regulační ventily do středotlakého stupně, kde dále expanduje a vykonává práci. Ze středotlakého stupně proudí dále do stupně nízkotlakého. Odtud se vede do kondenzátky, čímž je cyklus ukončen. Dodávají-li uvedené 3 stupně turbíny moment o velikosti 100 %, dělí se příspěvek dílčích stupňů přibližně v poměru 30, 40 a 30 %. Pokud má turbína 4 stupně, je vysokotlakému stupni předřazen ještě stupeň o velmi vysokém tlaku. V takovém případě je rozložení příspěvků 20, 20, 30 a 30 %.

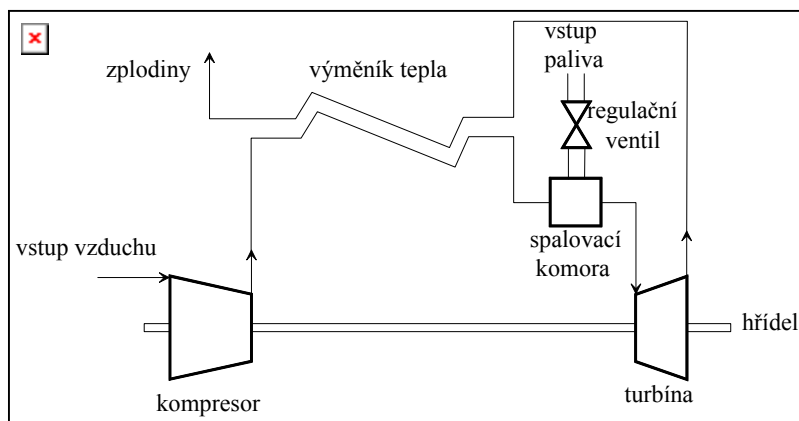
Tok páry v turbíně je řízen regulačním systémem. Pokud je alternátor synchronizován, bezpečnostní ventily jsou plně otevřeny a rychlost páry a výkon turbíny jsou řízeny regulačními ventily.

*Plynové turbíny* pracují se vzduchem, přičemž palivem je zemní plyn či olej. Nejznámější

uspořádání je systém s otevřeným regeneračním cyklem sestávajícím z kompresoru, spalovací komory a turbíny (obr. 1.3). Palivo je dodáváno regulačním ventilem do spalovací komory, kde se spaluje za přítomnosti ohřátého a stlačeného vzduchu dodaného kompresorem. Tento vzduch spolu se zplodinami spalování je veden do turbíny, kde expanduje a vzniklou kinetickou energii předává lopatkám turbíny podobně jako v turbíně parní. Médium vycházející z turbíny se používá k přehřívání vstupního vzduchu. Samozřejmě existují i sofistikovanější systémy využívající mezi chlazení či přehřívání. Typická účinnost systému s plynovou turbínou se pohybuje na úrovni 35 %.



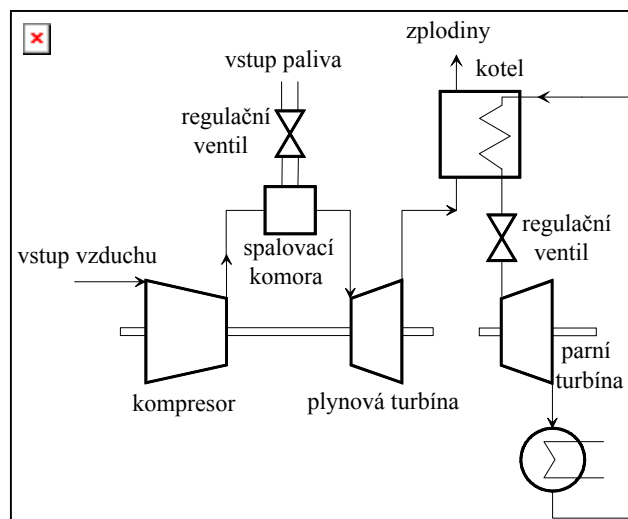
Obr. 1.2: Uspořádání s třístupňovou parní turbínou



Obr. 1.3: Plynová turbína s otevřeným regeneračním cyklem

U *plynových turbín s kombinovaným cyklem* (obr. 1.4) se zplodiny vedou z turbíny do kotle, v němž ohřívají páru a ta je použita pro výrobu elektrické energie v běžné parní jednotce. Běžná teplota zplodin v plynové turbíně je 535 °C, takže jejich následným zužitkováním lze významně zvýšit účinnost systému až na 55 %. Obvykle přitom dvě až tři plynové turbíny dodávají zplodiny na ohřev páry pro jednu parní turbínu. Plynové i parní turbíny přitom mohou být na jedné hřídeli.

Rozvoj těchto systémů je v poslední době dost intenzivní; kromě vysoké účinnosti mají mnoho dalších výhod a mezi hlavní patří nízké náklady a kratší doba potřebná k vybudování (obě položky jsou zhruba poloviční s ohledem na klasické systémy parní). Prakticky zde neexistují emise SO<sub>2</sub>, vyžadují menší údržbu a je zde daleko snazší manipulace se vstupními médii.



Obr. 1.4: Uspořádání s plynovou turbínou s kombinovaným cyklem

*Vodní turbíny* se liší podle celkového spádu, což je vertikální vzdálenost mezi nádrží a turbínou. Vodní elektrárny s malým a středním spádem využívají reakční turbíny, jako je např. turbína Francisova. Tyto turbíny pracují s velkým množstvím vody při relativně nízkých otáčkách. Jejich lopatky mohou být pevně umístěné či nastavitelné co do úhlu a otevření (Kaplanova turbína). Při velkých spádech se používají Peltonovy impulsní turbíny. Voda o vysokém tlaku je přiváděna k lopatkám pomocí trysek. Rychlost vody a tedy výkon turbíny je regulován jehlami v tryskách.

*Regulační systémy turbín* sestávaly dlouhá léta z mechanicko-hydraulických prvků a pro řízení rychlosti používaly Wattův regulátor (jehož přesnost však není velká). V současné době se používá elektro-hydraulický regulátor. Rychlost turbíny se v tomto případě měří elektronicky s vysokou přesností, případná odchylka od referenční rychlosti se zesílí a přivede se na zařízení ovládající ventily průtoku páry. Proces regulace je velmi sofistikovaný a neobejde se bez přítomnosti velkého množství dalších prvků.

## 1. 2. Přenos elektrické energie

Přenosové a distribuční sítě spojují jednotlivé elektrárny do jednoho systému a umožňují dopravovat elektrickou energii jednotlivým zákazníkům. Hlavními prvky jsou zde venkovní a kabelová vedení, transformovny a rozvodny. Doplnkové prvky představují sériové kondenzátory, reaktory a kompenzátory, spínací a měřicí prvky a konečně prvky ochranné.

### Venkovní a kabelová vedení

Pro přenos elektrické energie o vysokých napětích se užívají zpravidla vedení venkovní, kabelová se ve velké míře užívají pro středněnapěťové rozvody v městských zástavbách. Vzhledem k vysokým investičním nákladům a technickým problémům souvisejícím s kapacitními proudy je ovšem jejich užití podmíněno specifickými podmínkami (hustá zástavba, překřížení širokých řek či nedotknutelnost životního prostředí nebo krajiny v daném místě. Dostí obvyklé bývá kabelové spojení mezi elektrárnou a její rozvodnou.

Přenosové systémy bývají zdrojem ztrát činného výkonu, jenž je úměrný čtverci protékajícího proudu. Proto je snaha tyto systémy provozovat při vysokých napětích a co nejnižších proudech. Čím vyšší výkon se přenáší, tím vyšší napětí se používá. Z praktických důvodů se zavádí standardizace napěťových hladin v jednotlivých regionech. Bohužel zde existují odchylky vzniklé historicky, odchylky však nejsou příliš velké. V Evropě jsou obvyklé hladiny

110, 220, 400 a 750 kV, v Británii 132, 275 a 400 kV a v USA 115, 230, 345, 500 a 765 kV. V Japonsku existuje zkušební vedení 1100 kV a v Rusku 1200 kV. Nejvyšší možné napětí, při němž by bylo možno venkovní vedení provozovat, je omezené elektrickou pevností vzduchu a činí asi 2400 kV.

Vzhledem k velkým nákladům na stavbu venkovních vedení se v současnosti tato vedení budují jako vícepotahová. Pokud se předpokládá do budoucna přenos vyšších výkonů již na projektované trase, zvolí se takové stožáry, které umožní pozdější přidání dalšího potahu.

Distribuční sítě obecně pracují při nižších napětích. Zde jsou odchylky v různých částech světa již velmi značné, dané historicky a přístupem jednotlivých společností (USA 12 napěťových hladin od 2.4 do 69 kV, UK 6.6, 11, 33 a 66 kV, ČR 6, 10.5, 22 a 35 kV).

## **Rozvodny a transformovny**

Jedná se o místa, v nichž se propojují přenosové linky, transformátory, generátorové jednotky, monitorovací a řídicí zařízení atd. Je odtud řízen tok elektrické energie, transformuje se zde napětí a zajišťuje bezpečnost systému pomocí automatických ochran.

Všechny rozvodny obsahují celou řadu přívodů a vývodů soustředěných v odbočkách. Tyto obvody jsou připojeny na společný přípojnicový systém a vybaveny spínacími, měřicími a ochrannými přístroji. Každý vývod lze rozčlenit na primární a sekundární část. Primární část obsahuje přenosovou linku, výkonový transformátor, přípojnice a vysokonapěťovou stranu napěťových a proudových transformátorů. Sekundární část zahrnuje měřicí obvody na straně nízkého napětí napěťových a proudových transformátorů a řídicí obvody pro vypínače, odpojovače apod.

Přípojnice ve vnitřních rozvodnách jsou tvořeny pasovými měděnými či hliníkovými vodiči či podpíranými izolátory, ve venkovních rozvodnách se užívají vodiče splétané z hliníku a oceli (např. AlFe lana) visící na izolátorech. Přípojnice mohou být uspořádány mnoha způsoby, jež se liší možnostmi propojení a snadností obsluhy. Tato uspořádání se liší podle toho, jaká je hladina napětí, instalovaný výkon, očekávaná spolehlivost provozu atd. Velké rozvodny často vyžadují propracovaný systém přípojnic vyžadující značné investiční a provozní náklady.

## **Transformátory**

Úkolem transformátoru je jednak propojovat systémy o různých hladinách napětí a dále zajišťovat řízení napětí. Jsou proto zpravidla vybaveny na jednom či více vinutích odbočkami umožňujícími změnu závitů. Podle jejich funkce v přenosové soustavě je lze rozčlenit do třech kategorií: blokové a odbočkové transformátory, přenosové transformátory a distribuční transformátory.

Blokové a přenosové transformátory mají výkon od několika desítek MVA do více než 1000 MVA a bývají chlazené olejem. Magnetický obvod transformátoru je umístěn v nádobě naplněné olejem, jenž slouží jako chladivo a izolační médium mezi vinutími. Teplo vzniklé v důsledku Jouleových a magnetizačních ztrát je odváděno vnějšími radiátory. Cirkulace oleje je buď přirozená nebo nucená. Vnější chlazení transformátoru je zpravidla zajištěno vzduchem prostřednictvím ventilátorů. Velikost transformátoru je většinou omezena dopravními možnostmi; z těchto důvodů se velké jednotky dodávají ve formě tří jednofázových transformátorů. Menší se ovšem dodávají v integrované podobě jako trojfázové.

*Blokové transformátory* převádějí svorkové napětí generátoru (10 – 32 kV) na napětí přenosové. V případě velkých generátorových jednotek je běžné uspořádání jeden generátor - jeden transformátor, u menších jednotek dva generátory - jeden transformátor. Spojení transformátoru bývá trojúhelník - hvězda s uzemněnou nulou. Trojúhelník na straně nízkého napětí představuje cestu pro cirkulaci proudů vzniklých v důsledku nesymetrie zátěží i nežádoucí

složky třetí harmonické obsažené v magnetizačním proudu. V případě velkých rozvodů, do nichž pracuje mnoho generátorových jednotek některé hvězdy nebývají uzemněny, aby se omezily případné zkratové proudy v síti vyvolané jednofázovým zkratem.

Přenosové transformátory propojují části sítě o různých hladinách napětí, zásobují síť distribuční a přímo spojují přenosové síť s velkými odběrateli. Jsou zapojeny stylem uzemněná hvězda - uzemněná hvězda. Často mívají třetí, nízkonapěťové vinutí spojené do trojúhelníka, kterým vycirkulují proudy pocházející od nesymetrických zátěží. Jinak toto vinutí slouží pro napájení spotřeby v místní rozvodně nebo je připojeno na místní kompenzátor jalového výkonu. V případě, že se převod příliš neliší od jedné (v případě po sobě jdoucích napěťových hladin), je možno použít autotransformátor (je levnější).

Distribuční transformátory mají uzemněnou hvězdu na vysokonapěťové straně, zatímco strana středního napětí je spojena do trojúhelníka z již uvedených důvodů. Autotransformátory jsou obvykle spojeny do uzemněné hvězdy.

V sítích často dochází vlivem kolísání zátěže k napěťovým fluktuacím. Z těchto důvodů mají transformátory odbočky, jimiž lze regulovat napětí v rozsahu  $\pm 10\%$ . Odbočky jsou zpravidla na straně vyššího napětí (důvodem je práce s nižšími proudy) a to v blízkosti uzemněného konce vinutí. U autotransformátorů jsou odbočky umístěny také na vinutí vysokého napětí, ale v blízkosti společné části vinutí. Zajistit lze ovšem nejen změny napětí, ale i fázového posunu.

### **Shunty a sériové prvky**

Tyto prvky se používají z mnoha důvodů. Hlavními jsou kompenzace jalového výkonu a stabilita systému.

Obecně je zapotřebí, aby se jalový výkon nepřenášel na velké vzdálenosti (zatěžuje nepřípustně přenosová vedení). Výhodnější je, vyrobí-li se přímo u zátěže, jež jalový výkon potřebuje ke své činnosti. Nejlevnější způsob zajištění jalového výkonu je použití kondenzátorů či tlumivek připojených přímo na přípojnice nebo k terciárnímu vinutí příslušného transformátoru. Shunty lze ovšem používat podél přenosových linek za účelem minimalizace ztrát a úbytku napětí. Statické shunty jsou připojovány ručně nebo automaticky prostřednictvím napěťových relé.

Pokud je požadovaný jalový výkon malý, může být kapacitní výkon přenosové linky daleko vyšší a napětí na dlouhých vedeních (přes 200 km) může dosáhnout nepřípustných hodnot (příbuzný je Ferrantiho efekt). Pak mohou shuntovací reaktory tento kapacitní jalový výkon odebírat a potlačovat vzniklé přepětí.

Jiným tradičním kompenzátozem je synchronní stroj s vyniklými póly běžící naprázdno, který je schopen pomocí řízení budicího proudu dodávat či odebírat jalový výkon. Přebuzený stroj dodává jalový výkon, podbuzený jej naopak odebírá. Vzhledem k tomu, že synchronní kompenzátory jsou nákladné, doplňují se statickými kondenzátory a induktory, čímž se investiční i provozní náklady snižují. Výkon synchronních kompenzátozem se pohybuje na úrovni několika MVA až několika set MVA.

Sériové kondenzátory na přenosových linkách se používají k eliminaci jejich reaktance. To má za důsledek zlepšení elektromechanické a napěťové stability v soustavě. Indukční reaktance se kompenzuje většinou v rozsahu mezi 25 - 75 %. Plná kompenzace se nikdy neprovádí, vedla by ve svých důsledcích k sériové rezonanci při základním kmitočtu. Složitější by bylo i opatření takových linek ochranami. Sériové kondenzátory se umísťují buď na začátek vedení, jeho konec, nebo uprostřed. Jsou-li umístěny uprostřed vedení, mají i příznivý vliv na velikost zkratových proudů (jsou nižší), na druhé straně jejich řízení a monitorování je daleko snazší, jsou-li umístěny na začátku či konci vedení a rozděleny na poloviny, z nichž každá kompenzuje asi 30 %. Problémy se sériovými prvky mohou nastat tehdy, objeví-li se na nich



vyšší napětí (např. při zkratu za sériovým prvkem). Takové případy jsou ovšem řídké a proto se prvky na plné napětí nedimenzují (během zkratu se přemostí bypassem a poté se vymění).

Samostatnou kapitolou jsou v této oblasti zařízení na bázi výkonových elektronických prvků, jež jsou daleko rychlejší a pružnější než zařízení mechanická (přepínání odboček, kompenzace atd.).

### **1. 3. Poruchy a ochrana proti nim**

Žádný systém není zcela spolehlivý a může být poškozen vnitřní či vnější poruchou. Poškozený prvek by měl být neprodleně vyřazen z provozu, jinak může dojít k jeho úplnému zničení. Kromě toho by poškozený prvek mohl negativně ovlivňovat další prvky (zejména blízké) a ve svých důsledcích provoz celého systému. Ochranné prvky proto musí detekovat jakoukoli závažnější poruchu (někdy i větší odchylku od standardního chodu) a příslušný prvek odpojit. Ochranná zařízení v energetických sítích sestávají typicky z proudových a napěťových transformátorů, relé, sekundárních obvodů napájejících relé a řídicích vypínací prvky a konečně z pomocných zdrojů napájejících relé.

Činnost ochrany musí být rychlá, spolehlivá a selektivní. Především rychlost odezvy a vysoká spolehlivost je životně důležitá pro rozsah poškození během poruchy. Selektivita pak vyjadřuje schopnost odpojit výlučně poškozenou část sítě. Každý důležitý prvek je chráněn hlavní a záložní ochranou (jejich schémata se liší). Obě ochrany, pokud je to možné, přitom pracují na jiných fyzikálních principech.

#### **Poruchy přenosových linek, transformoven a rozveden a generátorových jednotek**

Hlavní poruchou na přenosových linkách jsou zkraty. Venkovní vedení jsou před úderem blesku chráněny zemnicími lany a bleskojistkami. Přesto bývá blesk jednou z nejrozšířenějších příčin poruch (jednofázové poruchy tvoří 75 – 90 % všech poruch, zemní vícefázové zkraty jen asi 5 – 15 % poruch a vícefázové poruchy bez zemního spojení 5 – 10 %). 80 – 90 % všech poruch na vedení jsou krátkodobého charakteru a jsou způsobeny přeskokem mezi jedním či více vodiči a uzemněnou kovovou částí. Zbývající poruchy jsou dlouhodobější či trvalé. Dočasné poruchy lze odstranit vypnutím vedení na dobu, po kterou zhasíná oblouk, a poté znovuzapnutím po určité době, která se nazývá mrtvá doba. Tento proces, jenž se nazývá opětovné spínání, významně přispívá ke spojitému zásobování energií.

Poruchy na rozvodnách jsou podstatně řídké, než na přenosových linkách. Nejčastěji se jedná o přeskok na izolátorech, poruchu přístrojů, případně lidské selhání. Porucha na rozvodně ovšem může mít daleko závažnější důsledky, než na přenosové lince. Důležité jsou zde například distanční ochrany.

Na generátorové jednotce může dojít k řadě poruch. Z hlediska nákladů na opravu jsou nejzávažnější poruchy uvnitř generátoru a blokového či odbočkového transformátoru. Ochranný systém těchto prvků sestává ze tří diferenciálních relé. Vůči poruchám ze strany vedení se lze bránit distančními ochranami na straně vysokého napětí blokového transformátoru. Kromě toho zde působí celá řada dalších ochrany.