

# Řízení jalového výkonu synchronního generátoru

Richard Habrych

**ABSTRAKT:** Článek popisuje způsoby řízení jalového výkonu synchronního generátoru jako nástroje pro dosažení napěťové stability elektrizační soustavy. Je podrobně popsán provozní diagram synchronního generátoru a jsou uvedena fyzikální omezení pro různé provozní stavy. Kromě těchto omezení jsou uvedeny technické a organizační omezovací podmínky pro produkci jalového výkonu synchronního stroje. Dále jsou popsány technické způsoby řízení jalového výkonu synchronního generátoru a technické možnosti pro provozovatele soustavy pro řízení změny dodávky jalového výkonu synchronního stroje.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** synchronní generátor, provozní diagram synchronního generátoru, napětí, jalový výkon, vlastní spotřeba elektrárny

**ABSTRACT:** Paper describes ways to control reactive power of synchronous generator as a tool to achieve the voltage stability of power system. The operating diagram of synchronous generator is described in detail and physical limits for the various operating modes are reported. In addition to these restrictions the technical and organizational conditions of restraint for the production of reactive power of synchronous machines are listed. Below are described the technical ways to control reactive power of synchronous generator and technical options for a system operator to control the reactive power supply changes of synchronous machine.

**KEYWORDS:** synchronous generator, synchronous generator operating diagram, voltage, reactive power, own consumption of the power plant

## 1. Úvod

K základním úkolům provozovatelů přenosových a distribučních soustav patří zabezpečit disponibilní přiměřené okamžité rezervy jalového výkonu v prostředí synchronních generátorů a případně různých typů kompenzátorů, za účelem zajištění technického fungování energetického systému (za normálního stavu) a jeho obnovení do normálního stavu po poruše. [1] Efektivní využívání této regulační rezervy jalového výkonu také umožní dosáhnout optimální hodnoty technických ztrát v soustavě, předejít napěťovému kolapsu, zajistit konečnému odběrateli kvalitní dodávku elektřiny při stabilním napětí a také šetřit mechanismy změny odboček transformátorů svých i svých velkoodběratelů od zbytečných přepínání. V poslední době slouží také k eliminaci negativního zpětného vlivu některých OZE na elektrizační soustavu.

Provozovatel soustavy musí mít toky jalového výkonu plně pod svou kontrolou, aby dosáhl toho, že v jeho soustavě poteče právě tolik jalového výkonu, kolik soustava v daném okamžiku opravdu potřebuje. Tuto podmínku musí splňovat při všech provozních stavech soustavy a to rozhodně není jednoduchý úkol. [5]

K jeho splnění má však k dispozici vynikající akční člen, jehož kvalifikovaným využíváním dosáhne při řízení toků jalového výkonu vysokého stupně efektivity, a to prakticky při nulových provozních nákladech a také relativně nízkých nákladech investičních. Jedná se o jalový výkon, který je k dispozici na synchronních generátorech elektráren a tepláren zapojených do soustavy při jejich běžné dodávce činného výkonu. [3]

Tento jalový výkon vzniká, z čistě obchodního hlediska, jako sekundární produkt při výrobě výkonu činného a nelze ho nevytvořit. Navíc jeho výroba nic nestojí, na rozdíl od jalového výkonu, který je generován ve statických nebo rotačních kompenzačních zařízeních či výkonových tlumivkách a vyžaduje určitý odběr činného výkonu. Dodávku jalového výkonu synchronních generátorů lze v současné době řídit velice přesně a plynule a jalový výkon je k dispozici v řadě uzlů soustavy (podle rozmístění elektráren a tepláren). V případě moderních

strojů neznamenaají ani časté změny požadavků zvýšené opotřeby technických prostředků těchto generátorů. [4]

V rámci tohoto článku jsou prezentovány možnosti, které má provozovatel soustavy (po dohodě s provozovatelem výroby) při využívání jalového výkonu synchronního generátoru.

## 2. Jalový výkon synchronního generátoru

### 2.1 Výchozí předpoklady

V elektroenergetické soustavě platí, že jalový výkon je v silné fyzikální vazbě s napětím a činný výkon s frekvencí. Opačně jsou tyto fyzikální vazby minimální a na základě tohoto poznatku lze i zanedbat.

Existence této fyzikální vlastnosti umožnila oddělit od sebe řízení obou výkonů v soustavě do samostatných (jak funkčně, tak i technicky) systémů, které jsou na sobě nakonec i obchodně nezávislé. [8]

Závislost mezi napětím v daném uzlu soustavy a změnou jalového výkonu v jiném uzlu soustavy, způsobenou např. změnou jalového výkonu synchronního generátoru, lze vyjádřit následujícím vztahem [15]:

$$\Delta U_i = a_{ij} \cdot \Delta Q_j \quad (1)$$

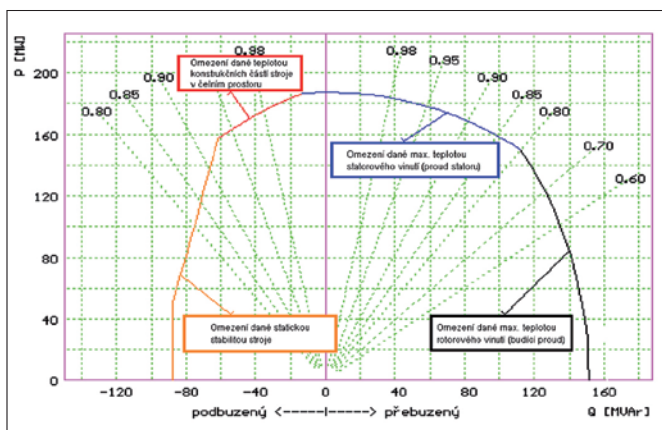
$\Delta U_i$  - změna napětí v uzlu i,

$a_{ij}$  - koeficient citlivosti změny napětí v uzlu i na změnu jalového výkonu v uzlu j,

$\Delta Q_j$  - změna jalového výkonu v uzlu j.

Z uvedeného vztahu vyplývá, že k dosažení požadované změny napětí v libovolném uzlu sledované soustavy je potřeba provést změnu dodávky jalového výkonu vypočtené velikosti v některém z blízkých uzlů této soustavy, popřípadě provést změnu prostředky připojenými do tohoto uzlu. Jak velká bude tato změna napětí, závisí vedle velikosti změny dodávky jalového výkonu také na aktuální hodnotě citlivostní konstanty mezi těmito dvěma uzly soustavy. Tento koeficient je dán topologií soustavy ve sledovaném okamžiku.

Zvýšení dodávky jalového výkonu do soustavy vyvolá zvýšení



Obr. 1. Provozní diagram synchronního generátoru

napětí a naopak jeho snížení vyvolá snížení napětí. [12]  
Z hlediska efektivního řízení jalového výkonu je tedy důležité mít v soustavě dostatek zdrojů jalového výkonu, z nichž největší část je představována synchronními generátory, které budou disponovat adekvátní rezervou jalového výkonu a budou stále v provozu.  
Velikost disponibilní rezervy jalového výkonu jednotlivých generátorů je pak dána provozním diagramem synchronního generátoru s akceptováním všech technických a organizačních omezení.

## 2.2 Provozní diagram

Provozní diagram nebo také PQ diagram (obr. 1) je grafem závislosti činného a jalového výkonu synchronního generátoru na jeho napěťových a proudových hodnotách a je povinnou součástí dokumentace, kterou dodává výrobce každého stroje. Aktuální provozní stav stroje je charakterizován pracovním bodem v tomto diagramu. [9]

### Provozní diagram je charakterizován

- omezením maximálním budičím proudem – černá výseč kružnice při induktivní zátěži,
- omezením maximálním proudem statoru – modrá výseč kružnice při induktivní zátěži,
- omezením magnetickým polem v čelním prostoru – červená křivka při kapacitní zátěži,
- omezením statickou stabilitou – oranžová křivka při kapacitní zátěži.

### Omezení maximálním budičím proudem

Rotorový proud nesmí s ohledem na maximální teplotu vinutí rotoru daného normou překročit zadanou hodnotu. Obvykle se pro konstrukci diagramu použije **jmenovitý budičí proud** (pak křížení – přechod mezi omezením statoru a rotoru je na čáře **jmenovitého účiníku**). Tato omezující čára je geometrickým místem provozních stavů nepřesahující danou hodnotu budičího proudu. U magneticky nenasyceného stroje by to byla kružnice se středem v bodě nulového budičího proudu, který se nachází v průsečíku osy  $Q$  a čáry statické stability. Vlivem syčení je ale tato kružnice mírně deformovaná.

### Omezení maximálním proudem statoru

Statorový proud nesmí s ohledem na maximální teplotu vinutí statoru daného normou překročit určitou hodnotu. Obvykle se pro konstrukci diagramu použije jmenovitý proud statoru (pak křížení – přechod mezi omezením statoru a rotoru je na čáře jmenovitého účiníku). Tato omezující čára je

kruhovým obloukem se středem v průsečíku os činného a jalového výkonu (tento bod odpovídá v provozním diagramu chodu naprázdno) a s poloměrem daným hodnotou statorového proudu.

### Omezení magnetickým polem v čelním prostoru

Toto omezení souvisí s účinkem rozptylového magnetického pole čelních částí vinutí statoru a rotoru, které vstupuje v axiálním směru do jádra statoru a přitom indukuje v masivních konstrukčních částech vířivé proudy, které tyto části zahřívají. V přebuzeném režimu, kdy stroj dodává jalový výkon do sítě, působí obě vinutí vektorově téměř proti sobě a výsledné rozptylové pole je slabé. V podbuzeném režimu, kdy stroj ze sítě jalový výkon odebírá, se fázový úhel statorového proudu změní natolik, že výsledné rozptylové pole výrazně zesílí. Omezující čára je za určitých zjednodušujících předpokladů přibližně kružnice, jejíž střed leží na ose  $Q$ . Poloha středu a poloměr kružnice závisí na geometrickém uspořádání a materiálech použitých v koncových (čelních) partiích stroje.

### Omezení statickou stabilitou

Mez statické stability je definovaná jako provozní stav alternátoru, v němž je jeho synchronizační moment nulový, po překročení meze statické stability vypadne stroj ze synchronizmu. Velikost momentu je přímo úměrná sinu zátěžného úhlu, tj. úhlu mezi magnetizačním a budičím proudem. Pro zachování statické stability je nutné, aby byl synchronizační moment kladný, tj. aby zvýšení činného výkonu odpovídalo též zvýšení zátěžného úhlu. Tato podmínka je při výše uvážené sinusové závislosti splněna pouze tehdy, pokud je zátěžný úhel  $< 90^\circ$ . Omezující čára začíná na ose  $Q$ , její průsečík s osou  $Q$  je dán jalovým výkonem, který si stroj bere ze sítě při nulovém budičím proudem. Obvykle se u provozních diagramů zátěžný úhel nastavuje na  $80^\circ$  a minimální budičí proud se nastavuje jako nenulový, obvykle 0,15 jmenovitého budičího proudu.

### Poznámky

- Z tvaru provozního diagramu je vidět, že disponibilní rezerva jalového výkonu klesá s růstem výkonu činného. Obecně je proto možné dosáhnout i takového provozního stavu, kdy generátor, k velké neolibosti svého provozovatele, dodává dočasně do soustavy více jalového než činného výkonu.
- Tvar diagramu lze v určité míře měnit změnami velikostí omezujících proudů, např. když nejsou jmenovité proudy na hranici, kterou dovoluje norma, lze rozšířit oblast provozního diagramu v přebuzeném režimu. U omezení v čelním prostoru lze změnou konstrukčních materiálů, např. nemagnetické stahovací desky či použitím měděného stínění, rozšířit oblast v podbuzeném režimu, důsledkem toho však je prodezaní stroje.
- Statická stabilita je dána konstrukcí stroje a již ji nelze zásadně měnit. Určitou možnost posunu poskytuje změna jmenovitého napětí, ale jen v rozsahu  $\pm 5\%$ , protože změnou napětí se ovlivňují další parametry stroje, což je nežádoucí.
- Nastavení využitelného jalového výkonu musí být uděláno tak, aby se za běžného provozu nedostaly do činnosti hlídače a omezovače generátoru, neboť by jejich signalizace obtěžovaly operátora.
- V legislativních materiálech propojených evropských soustav ENTSO-E (Policy 14) je v požadavcích na regulační rozsah bloku uvedeno:  
Generátor musí být schopen dodávat jmenovitý činný výkon

v rozmezí účinníků  $\cos\phi_{IND} = 0,85$  (chod generátoru v přebuzeném stavu) a  $\cos\phi_{KAP} = 0,95$  (chod generátoru v podbuzeném stavu) při kmitočtu v rozmezí 48,5 až 50,5 Hz a při dovoleném rozsahu napětí buď  $\pm 5\% U_n$  na svorkách generátoru, nebo 400 kV  $\pm 5\%$ , 220 kV  $\pm 10\%$  a 110 kV  $\pm 10\%$  na straně vvn blokového transformátoru.

### 2.3 Technické a organizační omezovací podmínky

Pro řízení jalového výkonu lze využívat celý projektovaný provozní diagram generátoru pouze výjimečně, a to kvůli řadě technických a organizačních omezení, která mohou na výrobně nastat, neboť běžná výrobní není projektována pouze s ohledem na své efektivní čerpání jalového výkonu generátorů.

Čerpání jalového výkonu synchronního generátoru může být proto v praxi omezeno [17]:

- **Napětím na svorkách generátoru (generátorové napětí), a to doporučenou hodnotou 5% jmenovitého napětí.** Podle dlouhodobé napěťové potřeby lze udělat tzv. přečepování blokového transformátoru (nastavení jeho odbočky) a tím ovlivnit čerpání disponibilního jalového výkonu v potřebném směru. Přečepování je jednorázová operace, kterou provádí např. pracovník elektrárny, přičemž vyndá klín a vloží ho do jedné ze dvou zbývajících poloh převodu transformátoru. To může pochopitelně provádět pouze při odpojeném transformátoru a dodržení všech pravidel bezpečnosti práce.

- **Napětím vlastní spotřeby generátoru při blokovém uspořádání výroby.** Na obr. 2 jsou uvedeny dva základní způsoby napájení vlastní spotřeby výroby zapojené do napěťové soustavy 110 kV. Na prvním obrázku je napájení při blokovém uspořádání, které se používá hlavně u elektráren s vyšším instalovaným výkonem. Na druhém obrázku je vlastní spotřeba napájena přímo ze soustavy 110 kV. Toto zapojení se využívá hlavně u menších tepláren nebo jako záložní napájení větších elektráren. Z hlediska řízení jalového výkonu generátorů je nesporně výhodnější druhá varianta, neboť napětí na vlastní spotřebě je závislé na napětí soustavy 110 kV (a nastavené odbočce transformátoru 110 kV/vn) a neomezuje dodávku jalového výkonu generátoru. Proto se budeme dále věnovat pouze první variantě, v níž se napětí vlastní spotřeby přímo mění v závislosti na hodnotě dodávky jalového výkonu generátoru.

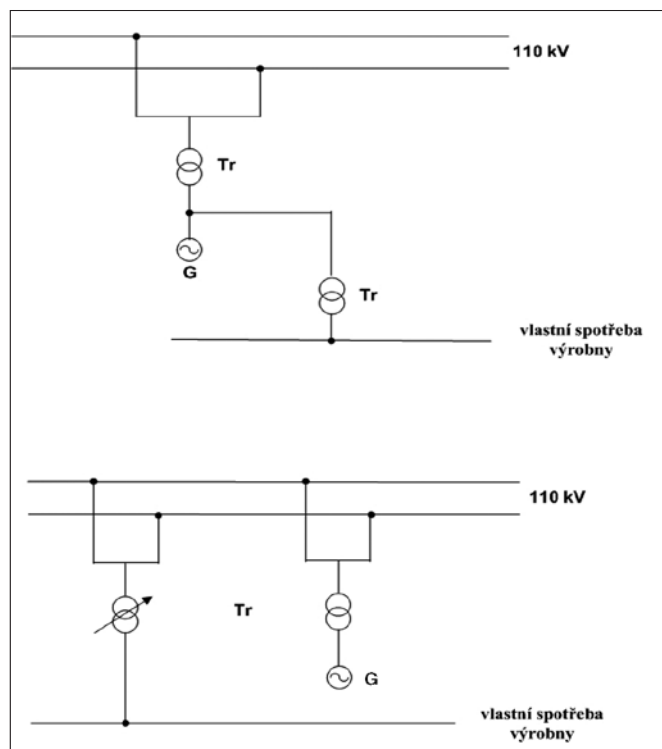
Velikost tolerance napětí na vlastní spotřebě elektrárny je nastavována podle schopnosti hlavních přístrojů elektrárny korektně pracovat při minimální a maximální hodnotě napětí vlastní spotřeby.

Omezení napětí na vlastní spotřebě výroby lze významně eliminovat transformátorem vlastní spotřeby s regulací odboček pod zatížením.

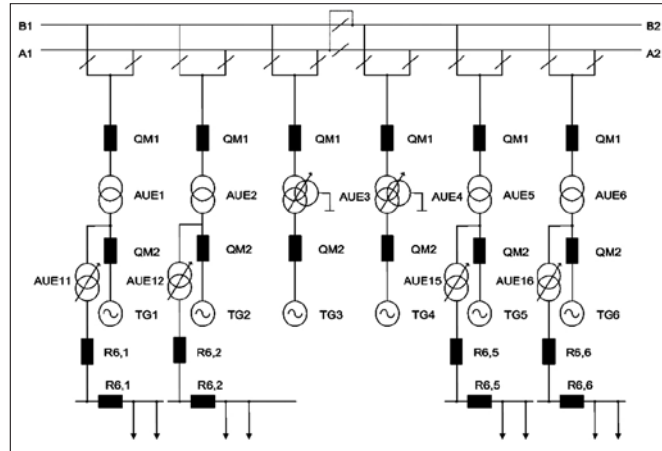
Při nastavení příliš širokého pásma napětí na vlastní spotřebě elektrárny může dojít vlivem přechodových dějů v soustavě k podpětí a problémům při startu těžkých pohonů vlastní spotřeby nebo k přepětí.

Naopak při nastavení příliš úzkého pásma napětí na vlastní spotřebě elektrárny dochází k nárůstu počtu regulací na tomto transformátoru vlastní spotřeby a tím i k jeho rychlému technickému opotřebení (u vlastních spotřeb s transformátory s regulací odboček pod zatížením) nebo zbytečnému omezení čerpání jalového výkonu u transformátorů ostatních.

V případě nevhodně nastavené regulační rezervy generátoru s transformátorem vlastní spotřeby bez možnosti změny odbočky pod zatížením je možné udělat při odstaveném generátoru přečepování těchto odboček.



Obr. 2. Varianty napájení vlastní spotřeby výroby



Obr. 3. Napájení vlastní spotřeby elektrárny z terciárního vinutí blokového transformátoru

- **Napětím na účelové spotřebě areálu připojené průmyslové elektroenergetické soustavy.** Jestliže má generátor závodní elektrárny složitější vyvedení do nadřazené soustavy, než je běžné vyvedení, tak jsou jeho regulační možnosti v oblasti jalového výkonu často významným způsobem omezeny. To je nutné vzít v úvahu při řešení architektury napěťového regulátoru.

- **Závislostí na elektrické soustavě (síti), do které se generátor připojuje, neboť se musí v dané lokalitě provést výpočet či měření na určení statické stability a dle toho nastavit hlídač meze podbuzení, což může v některých případech značně omezit schopnost generátoru odsávat ze soustavy přebytečný jalový výkon (práci v oblasti podbuzení).**

- **Další omezení mohou vycházet z aktuálního technického stavu generátoru, např. ohřívání statorových plechů na čelech generátoru nebo podobné poruchy či konstrukční chyby, které omezují čerpání jalového výkonu generátorů.**

- Absenci měření jalového výkonu generátoru do záporných hodnot. Toto omezení lze ještě najít u některých starších tepláren.
- Rozhodnutím odpovědného správce zařízení – subjektivní názor vyslovený např. během provozu generátoru nebo při certifikaci podpůrné služby regulace jalového výkonu.
- Společným blokovým transformátorem s transformátorem vlastní spotřeby v jednom stroji (**obr. 3**). Jedná se sice o úspornější vyvedení výkonu do soustavy, ale z hlediska čerpání jalového výkonu to znamená značné omezení.
- Provozní diagram synchronního generátoru může být také zbytečně omezen nastavením omezovacích podmínek přímo v řídicím systému bloku.
- Základní požadovaný regulační rozsah jalového výkonu je zúžen. Důvodem případné modifikace může být např. odlišná potřeba regulačního jalového výkonu v dané lokalitě PS anebo zvláštní technologické důvody. Taková modifikace často předpokládá uzavření zvláštní dohody mezi provozovatelem a uživatelem soustavy.

### Poznámky

- V minulosti se k určení hodnot dovoleného napěťového pásma využívaly technologicky poněkud drsnější tzv. vypínací zkoušky generátoru. Při těchto zkouškách se napětí na vlastní spotřebě generátoru snižovalo (a následně zvyšovalo) až došlo k výpadku generátoru ze soustavy. Hodnoty napětí při výpadku se zaznamenaly a sloužily pro nastavení omezovacích podmínek provozu generátoru. V současné době se již tyto zkoušky neprovádějí, neboť existuje riziko poškození stroje, ale výsledky měření jsou stále k dispozici a jsou technicky velice zajímavé. [10]
- Omezení na vlastní spotřebě elektrárny může být naopak částečně eliminováno menším regulujícím generátorem zapojeným přímo do této vlastní spotřeby. Stabilizující efekt napětí, ale není příliš významný. [21]
- Jestliže je do řízené soustavy zapojen generátor neumožňující dálkové řízení jalového výkonu, bude se část regulačního jalového výkonu zbytečně spotřebovávat na eliminaci jeho protireakcí na probíhající řídicí proces a celkově se zhorší kvalita tohoto regulačního procesu. To platí i pro generátor, který řízení sice umožňuje, ale z nějakého technického nebo organizačního důvodu se toto řízení u něho neprovádí. [13]
- Před intenzivnějším řízením jalového výkonu je také vhodné provést pečlivou kontrolu nastavení aktuálních hodnot působení generátorových ochranných, aby se nedostávaly zbytečně do funkce v případě, že se jalový výkon ještě pohybuje v oblasti schváleného provozního diagramu. [18]
- Při dosažení mezního stavu (z některého z výše uvedených důvodů) už generátory v daném směru jalový výkon pochopitelně dále měnit nemohou a tím se jejich dodávka (odběr) jalového výkonu v požadovaném směru zastavuje. V případě, že k tomuto provoznímu stavu dochází příliš často, hledají provozovatelé výroben ve spolupráci s pracovníky provozovatele soustavy a dodavateli technologie vhodná technická řešení, jak pásmo čerpání jalového výkonu generátorů více rozšířit v požadovaném směru. [25]
- Jako poněkud absurdní důvod, proč není možné přímo řídit jalový výkon generátorů, se v poslední době na některých závodních elektrárnách a menších teplárnách jeví instalace nových generátorů s technicky uzavřeným řídicím systémem, který udržuje nastavenou hodnotu účinníku. Přitom tuto hodnotu nelze operativně měnit. Tento problém by si měli uvědomit investoři nových bloků, neboť následné technické úpravy požadované platnou legislativou mohou znamenat velice nepřijemné vícenásledky.

## 3. Způsoby řízení jalového výkonu

### 3.1 Budicí soustava

#### 3.1.1 Základní požadavky

Budicí souprava generátoru zajišťuje řadu nutných funkcí pro provoz generátoru a její popis je nad rámec tohoto článku. Z pohledu požadavků na řízení jalového výkonu je důležité, že budicí souprava:

- zabraňuje převýšení rotorového nebo statorového proudu nad jmenovité hodnoty, které by mohlo vinutí generátoru způsobit nadměrný ohřev,
- zamezuje přechodu pracovního bodu generátoru do nedovolené oblasti podbuzení nebo překročení dovoleného poměru napětí generátoru a jeho kmitočtu,
- zajišťuje potřebné vlastnosti regulovaného generátoru vzhledem k elektrizační soustavě. Znamená to především rychlé a přiměřeně velké přibuzení nebo odbuzení při poklesu nebo zvýšení napětí sítě.

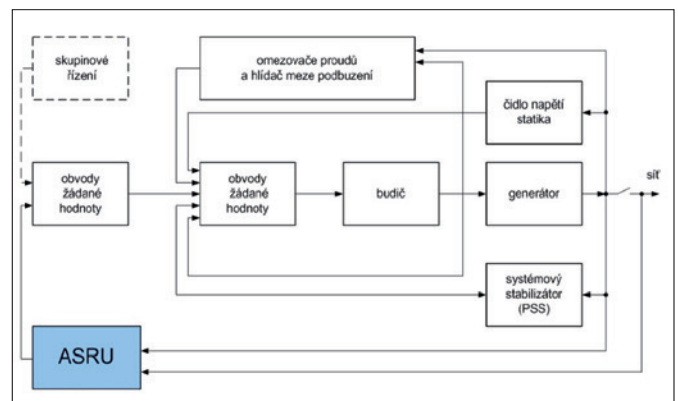
Generátor musí mít rovněž dostatečně velké tlumení přechodných dějů a oblast stability. Proto jsou pro regulaci buzení využívány kromě standardních zpětnovazebních signálů (napětí a proudy) i stabilizační zpětnovazební signály odvozené například z činného výkonu generátoru a jeho otáček. Každý generátor a jeho budicí souprava musí splňovat podmínky primární regulace napětí.

#### 3.1.2 Primární regulátor napětí

Primární regulace je základní regulační úlohou, jejímž cílem je udržovat zadané svorkové napětí generátoru pomocí změny buzení stroje. [2] Regulace reaguje v časovém rozsahu přibližně 1 až 2 s na rychlé změny zátěže, topologie systému a další přechodové jevy v soustavě. Působí lokálně a má přímý vliv na stabilitu celého systému prostřednictvím nastavených mezí daných maximálním proudem statoru, rotoru nebo mezí podbuzení. Požadavky na primární regulaci napětí bloku zajišťuje Primární regulátor napětí (PRN), který je standardní součástí technického vybavení bloku a kromě dalších funkcí umožňuje také bezpečné řízení jalového výkonu (obr. 4), např. je-li blok zapojen do Automatické sekundární regulace napětí (ASRU). [7]

#### Primární regulátor napětí:

- nesmí vykazovat necitlivost při řízení napětí,
- musí být vybaven obvody pro kompenzaci úbytku napětí na blokovém transformátoru pomocí tzv. statiky od jalového proudu (kompaundace pomocí nastavené statiky generátoru definuje vazbu mezi změnami napětí stroje a generovaného jalového výkonu),



Obr. 4. Primární regulátor napětí generátoru

- musí umožňovat impulsní řízení žádané hodnoty svorkového napětí generátoru,
- musí umožnit přenos měřených, řízených a řídicích veličin do jiných zařízení prostřednictvím digitální komunikace.

## Primární regulátor napětí je vybaven přídatnými automatikami:

- omezovačem statorového a rotorového proudu (ochranné obvody alternátoru),
- hlídačem meze podbuzení (HMP) – hlídání synchronismu generátoru,
- stabilizačními obvody pro tlumení kyvů v síti (systémové stabilizátory).

## Poznámky

- Nastavení HMP z hlediska statické stability se určuje po dohodě s provozovatelem soustavy a na základě příslušných výpočtů, neboť jeho nastavení z výrobního závodu často neakceptuje reálné vlastnosti soustavy.
- Existují PRN generátorů, u nichž lze měnit nastavení HMP za provozu dle aktuální reaktance regulované soustavy (zapojení vedení) a tím efektivně využívat regulační rezervu jalového výkonu těchto generátorů se zajištěním jejich bezpečnosti. [22]
- PRN generátoru lze povělovat pomocí impulzu na mechanismus změny velikosti zadaného generátorového napětí. Přitom u starších typů PRN s mechanickými prvky existuje omezení na minimální velikost realizovatelného impulzu, neboť příliš malý pulz nevede mechanismus PRN do činnosti. Maximální velikost je omezena spíše proto, aby nedocházelo k velkým skokovým změnám dodávky jalového výkonu do soustavy, než z technických důvodů na straně PRN, který je schopen realizovat velké změny dodávky jalového výkonu v krátkém čase (8–12 MVar/sek.). [23]
- PRN je primárně určen k ochraně generátoru proti přechodovým dějům ze soustavy a tato jeho funkce nesmí být v žádném případě omezena činností dalších zařízení (např. technických nadstaveb nad PRN), neboť by mohlo dojít k destabilizaci soustavy.
- PRN musí mít nastavenou rychlost změny  $dQ/dt$  na hlavním i záložním systému stejně, jinak by se při automatickém přepnutí změnila regulační vlastnosti generátoru v oblasti jalového výkonu. [24]
- Statika PRN generátoru musí být nastavena tak, aby PRN sousedního generátoru nereagoval na jeho změnu dodávky opačnou regulační činností.
- Chybně nastavená statika PRN generátoru vyvolává nežádoucí reakce na straně generátoru, které se projevují skokovými změnami dodávky jalového výkonu. Chybně nastavení statistik generátorů lze poznat při anomálním stavu soustavy, kdy se začnou generátory chovat přehnaně dynamicky nebo naopak příliš pasivně.
- Moderní primární regulátory napětí lze také přepnout do funkce regulátoru jalového výkonu, regulátoru účinniku nebo regulátoru budicího proudu. Při provedení přepnutí již nelze měnit jeho dodávku jalového výkonu ručně z velína výroby.
- PRN je primárně určen k ochraně generátoru proti přechodovým dějům ze soustavy a tato jeho funkce nesmí být omezena žádnou z jeho nadstaveb.
- U PRN generátorů je důležité nastavení rychlosti změny  $dQ/dt$  (reakce na jednotkový skok). Tato změna by neměla být příliš malá (eliminace odchylky by trvala dlouho), ale ani velká (nešlo by změnu  $Q$  plynule regulovat). [20]

- V případě, že záložní PRN není plnohodnotně vybaven hlídači a omezovači, nelze ho využívat k řízení jalového výkonu a většinou se využívá pouze pro bezpečný dojezd generátoru.

## 3.2 Řízení

Změny dodávky jalového výkonu synchronního generátoru lze technicky dosáhnout:

### 1) změnou zadaného generátorového napětí primárního regulátoru napětí generátoru

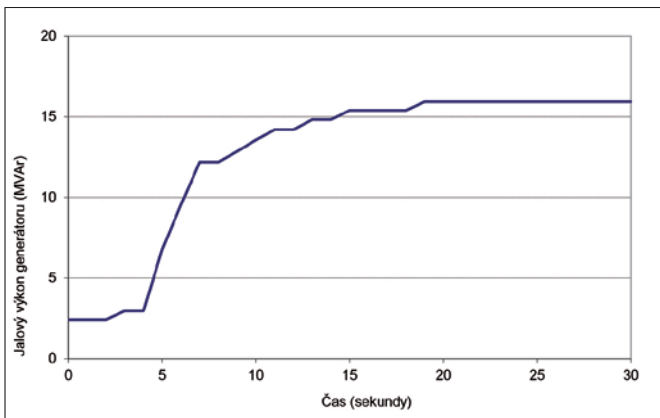
Změnou zadané hodnoty generátorového napětí dojde ke změně dodávky jalového výkonu generátoru, neboť PRN bude okamžitě vyrovnávat vzniklou regulační odchylku generátorového napětí. Jeho reakce bude rychlá. Velikost změny dodávky jalového výkonu je potom závislá na velikosti zasláního změnového impulzu (změny zadané hodnoty generátorového napětí) a rychlost této změny závisí na koeficientu  $dQ/dt$ .

### 2) změnou odbočky blokového transformátoru

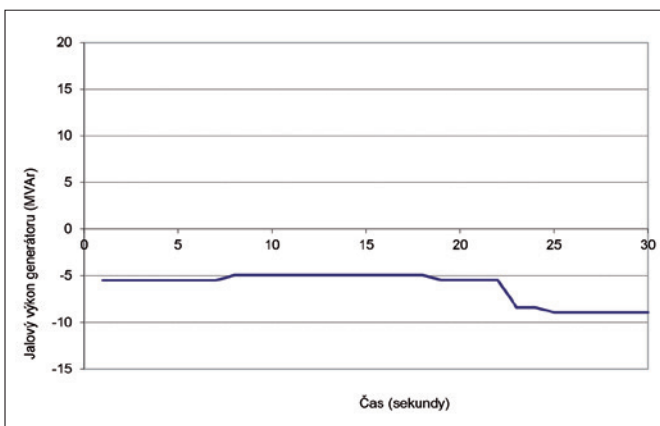
Změnou odbočky blokového transformátoru se provede přerozdělení jalového výkonu mezi nadřazenou soustavou a soustavou výroby. Tím se změní napětí v nadřazené soustavě. V ES ČR jsou elektrárny s blokovými transformátory s regulací odboček pod zatížením hodně výjimečné (na rozdíl od SRN). Z technického i provozního hlediska je jednoznačně výhodnější první uvedená možnost, a to z těchto důvodů:

- a) Provedení plynulé změny dodávky jalového výkonu do nadřazené soustavy (viz obr. 5), a nikoliv změny skokové, jako je tomu v případě užití transformátoru.
- b) Nedochází k nežádoucí reakci blokového transformátoru na změnu dodávky jalového výkonu na rozdíl od reakce generátoru na změnu odbočky blokového transformátoru, který chápe tuto změnu jako napěťovou poruchu. Na tu pak reaguje rychlou eliminací vzniklé regulační odchylky generátorového napětí a tím i částečně eliminuje napěťový efekt změny odbočky.
- c) Velikost požadované změny jalového výkonu u synchronního generátoru lze velice přesně vypočítat a následně dostatečně spolehlivě a rychle zrealizovat. U blokového transformátoru se spíše jedná o určitý kvalifikovaný odhad velikosti předpokládané napěťové změny. [14]
- d) Nedochází k opotřebením technologického zařízení budícího soupravy generátoru, které u novějších typů nemá již žádné namáhané mechanické prvky.
- e) Změny dodávky jalového výkonu lze provádět neustále bez technologických a technických omezení intervalů těchto změn. V případě blokového transformátoru je nutné počet povolených změn výrazně omezit, aby nedošlo k poškození transformátoru a tím i k dočasnému odstavení generátoru. [16]
- f) Možnost zadání malé i velké změny dodávky jalového výkonu do uzlu podle aktuální potřeby nadřazené soustavy. V praxi je možné využívat pouze jednu z uvedených možností. Využívat obě současně nemá smysl (provedené změny jdou proti sobě).

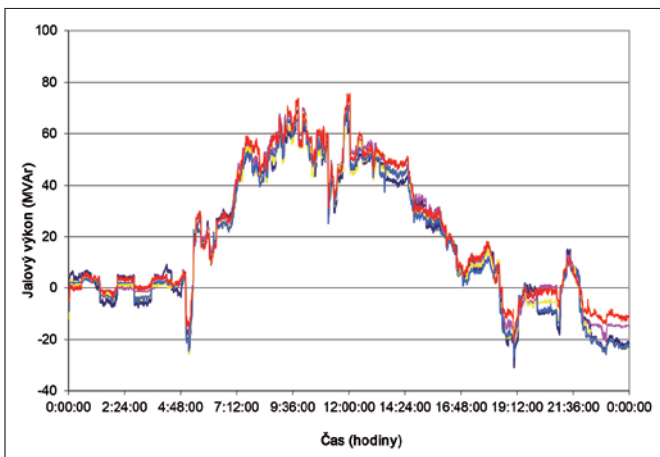
Zásadní rozdíl mezi řízením činného a jalového výkonu je otázka sousedních (elektricky blízkých) generátorů. V případě regulace činného výkonu lze využívat pro regulovanou změnu dodávky vybrané (obchodně nejvýhodnější) generátory v soustavě, a to bez ohledu na jejich umístění. V případě jalového výkonu je však potřeba koordinovat dodávku všech generátorů zapojených do jednoho uzlu (případně i více uzlů



**Obr. 5.** Řízená změna dodávky jalového výkonu generátoru



**Obr. 6.** Reakce sousedního generátoru



**Obr. 7.** Koordinovaná dodávka jalového výkonu čtyř generátorů

elektricky blízkých. Důvod je zřejmý z **obr. 6**, kde je vidět reakce sousedního generátoru na změnu dodávky jalového výkonu z **obr. 5** a to i s časovým zpožděním této reakce.

Na **obr. 7** je ukázka koordinované dodávky jalového výkonu čtyř generátorů 200 MW během anomálního provozního stavu soustavy. Drobné rozdíly v čerpání jalového výkonu jsou dány okamžitými odchylkami ve výrobě činného výkonu, neboť podle této výroby se určuje dodávka jalového výkonu.

### 3.3 Možnosti řízení jalového výkonu

Provozovatel soustavy má na výběr několik reálných

technických možností, jak povelovat změnu dodávky jalového výkonu synchronního generátoru [19]:

- zadaná hodnota generátorového napětí,
- zadaná hodnota jalového výkonu,
- zadaná hodnota účinníku,
- zadaná hodnota napětí v pilotním uzlu.

Tři poslední možnosti vyžadují instalaci technické nadstavby nad PRN.

#### 3.3.1 Zadaná hodnota generátorového napětí

Zadávání změny zadaného napětí generátoru z velína elektrárny jejím operátorem.

Touto možností disponuje povinně každý synchronní generátor, ale její praktický vliv na optimální rozdělování jalového výkonu v soustavě je minimální, neboť operátor na výrobně soustava od jeho generátoru potřebuje, a dispečer soustavy nemá čas na něm průběžně tuto změnu požadovat. Proto se tato technická možnost využívá hlavně pro občasně úpravy napětí na vlastní spotřebě elektrárny (udržení v předepsané toleranci).

#### Poznámka:

- Dispečer soustavy neprovádí ručně změnu dodávky jalového výkonu vybraných velkých bloků přímo z dispečinku soustav, a to z důvodu rizikových dopadů na vlastní spotřebu elektrárny a případně dalších technických a kompetenčních problémů. Je pro něho jednodušší a rozhodně i bezpečnější požádat telefonicky o provedení této změny obsluhu na velínu elektrárny.

#### 3.3.2 Zadaná hodnota jalového výkonu

Změnu zadaného napětí generátoru provádí zařízení nazývané Sekundární regulátor jalového výkonu (SRQ). Toto zařízení má za úkol udržovat nastavenou konstantní dodávku jalového výkonu generátoru do soustavy, a to za všech provozních podmínek.

Masivnější instalace samostatných zařízení SRQ na velkých elektrárnách se však nedoporučuje, neboť by to mohlo vyvolat kolaps soustavy během jejího anomálního stavu (napětíová nestabilita). Došlo by k zablokování činnosti PRN, a do soustavy by se tak nedostalo potřebné množství jalového výkonu. To je také důvod, proč se samostatný SRQ přestal používat.

#### 3.3.3 Zadaná hodnota účinníku

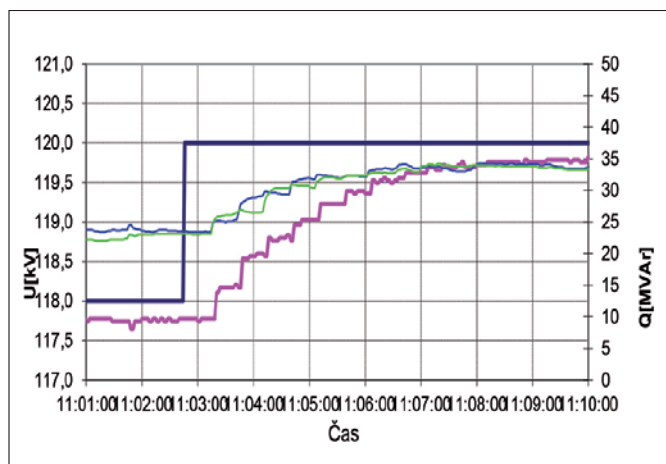
Změnu zadaného napětí generátoru provádí zařízení Regulátor účinníku, jehož úkolem je udržovat zadaný poměr dodávky činného a jalového výkonu bloku při všech provozních stavech soustavy. Mění proto dodávku jalové výkonu při změně dodávky činného.

V případě synchronních generátorů se tento způsob využívá pouze výjimečně u menších tepláren s napájením vlastní spotřeby ze soustavy. Z hlediska řízení toků jalového výkonu v soustavě je to zcela zbytečné zařízení, které svoji funkcí soustavě nijak nepomáhá.

#### 3.3.4 Zadaná hodnota napětí v pilotním uzlu

Změnu zadaného napětí generátoru provádí zařízení Automatický sekundární regulátor napětí (ASRU), jehož úkolem je průběžně vyrovnávat bilanci jalového výkonu v předacím uzlu generátoru se soustavou na zadané hodnotě napětí této soustavy. [11]

Na **obr. 8** je ukázková změna dodávky jalového výkonu dvou synchronních generátorů (světle modrá a zelená barva) v závislosti na změně zadaného napětí v předacím místě (tmavě



Obr. 8. Změna zadané hodnoty napětí 110 kV

modrá barva) a k tomu odpovídající změna měřeného napětí (barva fialová). Z průběhu je vidět, že ke změně dodávky jalového výkonu a tím i napětí dochází postupně (nesmí být narušena napěťová stabilita soustavy) a změna probíhá až do dosažení zadaného tolerančního pásma napětí (0,25 kV). Jedná se o nejrozšířenější způsob řízení jalového výkonu synchronních generátorů, neboť umožňuje splnění všech požadavků na hospodárnost, kvalitu a bezpečnost dodávky elektřiny konečnému odběrateli, a je proto i označen jako placená podpurná služba. [12]

#### 4. Závěr

Jalový výkon synchronních generátorů představuje značný potenciál a je na provozovatelích přenosových a distribučních soustav, jak jsou schopni tento potenciál efektivně využít ve prospěch konečného odběratele elektřiny. [10]

Na jedné straně se nároky na využívání přenosových a distribučních soustav neustále zvyšují a na druhé straně je stále složitější postavit nové vedení nebo rozvodnu. Proto se hledají technické způsoby, jak efektivně využívat možnosti stávajících soustav. K nim patří i optimální rozdělování toků jalového výkonu v těchto soustavách a s tím související potřeba využívat jalového výkonu synchronních generátorů jako zdrojů regulačního jalového výkonu.

V současné době je již k dispozici propracované technické řešení využívání jalového výkonu synchronních generátorů. V přenosové soustavě ČR jsou již také zapojeny všechny generátory do poskytování placené podpurné služby Regulace jalového výkonu. Nyní je hlavním úkolem v této oblasti zajistit využívání jalového výkonu u všech synchronních generátorů zapojených do regionálních a lokálních distribučních soustav, kde ještě řada těchto strojů soustavám v oblasti napětí nepomáhá.

V budoucnu bude mít asi každý uživatel soustavy, který disponuje synchronním generátorem, povinnost poskytnout jeho disponibilní jalový výkon provozovateli této soustavy (za dodržení všech nutných technických a organizačních podmínek a případně i za adekvátní úplatu), neboť s rozvojem OZE lze očekávat snížení úhrnného času provozu synchronních generátorů.

Proto bude nutné intenzivně pracovat na efektivním využívání zdrojů s frekvenčními měniči pro regulaci napětí, aby úbytek synchronních generátorů neznamenal snížení bezpečnosti, hospodárnosti a kvality dodávky elektřiny konečným odběratelům.

#### Literatura:

- [1] Jaroslav Doležal (Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze), Karel Witner (ČEPS, a. s.): *Regulace napětí a jalového výkonu – současné trendy*. Praha
- [2] Dokumentace primárního regulátoru napětí UNITROL 1000
- [3] Doc. Ing. Miloš Beran, CSc.: *Elektrická zařízení tepelných elektráren*. skripta VŠSE Plzeň, 1988
- [4] Prof. Ing. Zbyněk Ibler, DrSc. a kolektiv: *Technický průvodce energetika 1*. Nakladatelství Ben, 2002
- [5] Prof. Ing. Štěpán Matěna, DrSc. a kolektiv: *Výroba a rozvod elektrické energie*. SNTL, 1978
- [6] Doc. Ing. Ladislav Maixner: *Automatizace a automatizační technika 2*. Computer Press, 2014
- [7] Ing. Karel Máslo a kolektiv: *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*
- [8] Ing. Richard Habrych: *Regulace napětí a jalových výkonů*. Konference CIREC, Tábor 1989
- [9] Ing. Josef Křeček, Ing. Pavel Švejnár: *Regulace napětí a jalových výkonů v přenosové soustavě ČR*. Časopis Energetika 1994/11
- [10] Ing. Jaroslav Turek, Ing. Richard Habrych: *Příprava sekundární regulace napětí v rozvodnách 400 kV Hradec u Kadaně a Výškov*. Časopis Energetika 1994/11
- [11] Ing. Richard Habrych: *Automatická sekundární regulace U a Q v pilotních uzlech*. Konference Poděbrady 1996
- [12] Ing. Richard Habrych: *Sekundární regulace napětí a jalového výkonu v pilotním uzlu Hradec u Kadaně*. Mezinárodní kolokvium 1997 Praha – Vybrané problémy řízení elektrizační soustavy
- [13] Ing. Richard Habrych: *Regulace činných a jalových výkonů, frekvence a napětí*. Seminář Tatranská Lomnice 1997
- [14] Ing. Richard Habrych: *Automatická regulace napětí a jalových výkonů v uzlové oblasti 110 kV*. Seminář Modra – Harmonia, Slovenská republika 1998 – Aktuální problémy elektrizační soustavy a jejich řešení
- [15] Ing. Richard Habrych: *Hierarchický systém regulace napětí a jalových výkonů*. Cyklus E-2000
- [16] Ing. Richard Habrych: *ASRU v distribuční soustavě SČE, a.s.* Konference Poděbrady 2001
- [17] Ing. Richard Habrych: *Zkoušky a provoz ASRU Mělník 1*. Cyklus E-2001, seminář č. 5
- [18] Ing. Richard Habrych: *Automatická sekundární regulace napětí distribuční sítě 110 kV STE, a. s.* Časopis Energetika 2001/12
- [19] Ing. Richard Habrych: *Praktické poznatky z provozu systémů ASRU SME, a.s.* Konference Poděbrady 2002
- [20] Ing. Richard Habrych: *Obchodní aspekty podpurné služby regulace napětí a jalového výkonu*. Cyklus E-2002, seminář č. 1
- [21] Ing. Richard Habrych: *Praktické poznatky z provozu systémů regulace napětí*. Cyklus E-2002, seminář č. 3
- [22] Ing. Richard Habrych: *Zajištění kvalitních vstupních dat pro regulační systémy*. Cyklus E-2002, seminář č. 8
- [23] Ing. Richard Habrych: *Zajištění spolehlivosti regulačních systémů v DS*. Cyklus E-2002, seminář č. 9
- [24] Ing. Richard Habrych: *Praktické poznatky z provozu systému ASRU SČE, a.s.* Konference CIREC 2002
- [25] Ing. Richard Habrych: *Poznámky a náměty k certifikacím PpS a U a Q*. Cyklus E-2003, seminář č. 4



**Ing. Richard Habrych, Ph.D. (1960)** – vysokoškolské studium na VŠSE v Plzni ukončil v roce 1984. Po absolutoriu nastoupil jako odborný asistent do odboru ASDŘ pražské pobočky Výzkumného ústavu energetického Praha, s.p. Odborně se podílel na řešení výzkumných a vývojových úkolů z oblasti řízení napětí a jalových výkonů pro potřeby automatizovaných systémů dispečerského řízení. Účastnil se – postupně jako vedoucí řešitelského týmu – komplexu prací orientovaných na analýzu procesů v elektrosoustavách, na prognózu vývoje v oblasti regulace U a Q a dalších funkcí řízení ES, na rozvoj a aplikace trenážerů a expertních systémů. V procesu privatizace a následné transformace Výzkumného ústavu vznikla v r. 1998 akciová společnost EGÚ Praha Engineering, kde byl jmenován ředitelem společnosti a současně byl zvolen do funkce předsedy představenstva. Nyní působí v odborném útvaru společnosti Orgrez, a.s., jehož aktivity jsou zaměřeny na problematiku systémových a podpurných služeb v elektroenergetice, na procesy optimalizace provozu elektrosoustav a aplikace řídicích systémů.

Recenze: **doc. Ing. Emil Dvorský, CSc.**  
**Ing. František Kysnar, Ph.D.**  
**Ing. Karel Máslo, CSc.**