

# STELCOM – statický regulátor jalového výkonu

Ing. Vladimír Korenc, ELCOM, a. s., Dr. Ing. Tomáš Bůbela, ELCOM, a. s.,  
Ing. František Kysnar, EGC – EnerGoConsult ČB, s. r. o.

Každý si asi všiml, jak jsou v poslední době masově budovány fotovoltaické elektrárny (FVE). V provozu či ve fázi projektů a realizací jsou nejen stovky malých, domácích elektrárniček o výkonech od jednotek do desítek kilowattů, umístěných většinou na střechách domů, ale také rozsáhlá pole osazená fotovoltaickými panely o výkonech řádově megawattů. Čím je tento jev způsoben, všichni víme. Je to dotační politikou na obnovitelné zdroje, uzákoněnou povinností výkupu elektrické energie a dotovanou výkupní cenou za kilowatthodinu. Cílem tohoto článku však není rozebírat co je správné, výhodné nebo nevýhodné z hlediska investování do stavby FVE, ale upozornit na některé fyzikální aspekty provozování distribuční soustavy (DS) s velkým množstvím rozptýlených zdrojů.

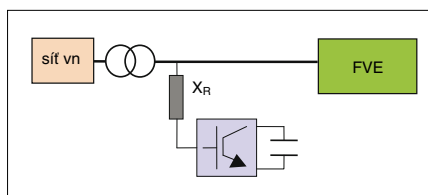
Málokdo si uvědomuje fyzikální problém tohoto masového nasazování rozptýlených zdrojů elektrické energie do distribuční soustavy. Distribuční soustava a její regulace byla původně navržena na klasickou distribuci elektrické energie od definovaných zdrojů ke spotřebičům. V případě rozptýlených zdrojů elektrické energie, kdy není možné prakticky ovlivnit výrobu v čase, vznikají problémy s regulací napětí v DS. Distribuční soustava, jako takovou, je nutno v budoucnosti přebudovat do tzv. *Smart Grids* (inteligentní rozvodná síť), která si sama poradí s rozptýlenou výrobou, akumulací a spotřebou elektrické energie. Budoucnost těchto sítí je zatím vzdálená, ale problém s regulací napětí v DS je některých případech nutné řešit už dnes. Jedna z možností je použití moderního výkonového elektronického zařízení, které je podrobněji popsáno v tomto článku a které můžeme považovat za jeden z prvních výkonových prvků budoucích *Smart Grids*.

## 1. Požadavky na připojení rozptýlených zdrojů s instalovaným výkonem nad 400 kW do sítě vn

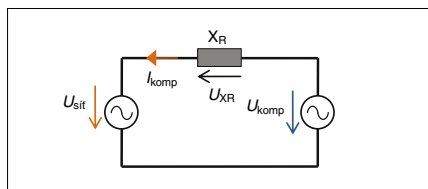
V Pravidlech provozování distribučních soustav (PPDS) v Příloze 4 – Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy (PDS), schválená Energetickým regulačním úřadem pro rok 2009, se pro zdroje s výkonem nad 400 kW, připojované do sítě vn, požaduje vybavení těchto zdrojů nástroji pro řízení jalového výkonu.

V příslušném odstavci Přílohy 4 PPDS jsou vyjmenovány následující požadavky:

- udržování pevné hodnoty zadaného účinníku  $\cos \varphi$ ,



Obr. 1. Připojení kompenzátoru k síti s elektrárnou s vlastním distribučním transformátorem



Obr. 2. Zjednodušené jednopólové schéma kompenzátoru

- udržování hodnoty účinníku  $\cos \varphi = f(P)$
- udržování zadané hodnoty jalového výkonu (odběr/dodávka) v rámci provozního diagramu stroje (PQ diagramu),
- udržování napětí v předávacím místě (na výstupu generátoru, za blokovým transformátorem nebo v pilotním uzlu DS) v rámci omezení daných PQ diagramem stroje.

Zdroj musí být schopen dodávat jmenovitý činný výkon v rozmezí účinníku  $\cos \varphi = 0,85$  až 1 (dodávka jalového výkonu) a  $\cos \varphi = 1$  až 0,95 (odběr jalového výkonu) při dovoleném rozsahu napětí na svorkách generátoru  $\pm 5\%$  jmenovitého napětí a při frekvenci v rozmezí 48,5 až 50,5 Hz.

Uvedený základní požadovaný regulační rozsah jalového výkonu může být modifikován, tedy zúžen nebo rozšířen. Důvodem

případné modifikace může být např. odlišná (nižší/vyšší) potřeba regulačního jalového výkonu v dané lokalitě DS nebo zvláštní technologické důvody (výrobní s asynchronními generátory, fotovoltaické a větrné elektrárny). Taková modifikace předpokládá uzavření zvláštní dohody mezi provozovatelem výroby a PDS.

U fotovoltaických elektráren se předpokládá jako postačující nižší rozsah účinníku 0,95 až 1 pro dodávku jalového výkonu a 1 až 0,95 pro odběr jalového výkonu.

Při silně kolísajícím výkonu pohonu (např. u některých typů větrných elektráren) musí být kompenzace jalového výkonu automaticky a dostatečně rychle regulována.

Takovéto zařízení nesmí negativně ovlivňovat úroveň signálu HDO.

## 2. Co je STELCOM

Známé zařízení s názvem STATCOM slovník Wikipedia vysvětluje jako statický synchronní kompenzátor, používaný v napájecích sítích k rychlé regulaci jalového výkonu, filtraci harmonických a eliminaci flikru. Je postaven na bázi výkonové elektroniky a spadá do skupiny zařízení označovaných FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*). Jsou to výkonová vysokonapěťová zařízení vylepšující kvalitu napětí v distribučních nebo průmyslových sítích.

Kompenzátor STELCOM je v principu to samé jako STATCOM, ale je konstruován na nízké napětí a menší výkon. V základním provedení dokáže regulovat velikost a směr proudu první harmonické v uzlu, a tím vlastně regulovat jalový výkon. Pokud generovaný proud fázově předbíhá napětí, jsme v oblasti kapacitní a zařízení se chová jako výkonový kondenzátor, tedy dochází ke kompenzaci. V opačném případě, pokud se generovaný proud zpožďuje za napětím, nacházíme se v oblasti induktivní, kde se pak zařízení chová jako tlumivka a dochází k dekompenzaci.

Protože se jedná o zařízení výkonové elektroniky, je možné proud regulovat zcela plynule s možností rychlé odezvy. Generovaný proud pak může mít minimální harmonické zkreslení. Nebo je možné naopak superponovat k základnímu proudu některé harmonické proudy s takovou amplitudou a fází, aby se v uzlu odečetly od stávajících harmonických, a tím se tyto nežádoucí harmonické v uzlu aktivně vyfiltrovaly.

Výrobní řada STELCOM určená pro regulaci jalového výkonu FVE připojovaných do sítě vn

typ	181-t400	285-t630	362-t800	452-t1000	565-t1250	725-t1600
výkon transformátoru do DS (kV·A)	400	630	800	1 000	1 250	1 600
napětí (V)	3 × 400					
proud (A)	181	285	362	452	565	725
připojitelný výkon FVE (kWp)	380	600	760	950	1 190	1 520
regulační rozsah (cos φ)	0,95 kapacitní až 0,95 induktivní					
rychlost odezvy (ms)	volitelný parametr (minimálně 20 ms)					
celkové harmonické zkreslení proudu	< 5 %					
frekvence (Hz)	50 (volitelně 60)					
komunikační protokol	IEC 60870-5-104 nebo IEC 61850					
komunikační připojení	Ethernet, GSM, případně RS-485 pro diagnostiku					

### 3. Princip elektronického kompenzátoru jalového výkonu

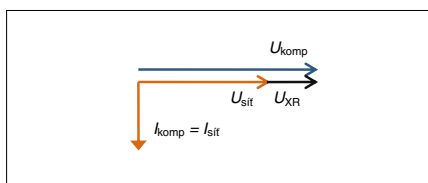
Kompenzátor STELCOM je proudový zdroj dodávající do sítě takovou velikost jalového proudu, aby byl docílen požadovaný účinník. Generování proudu je v principu zajištěno řízením napěťového zdroje připojeného přes indukčnost do sítě. Kompenzátor je standardně třífázový, v případě potřeby ho lze modifikovat i na jednofázové provedení.

Obr. 1 ukazuje příklad připojení kompenzátoru k fotovoltaické elektrárně s vlastním distribučním transformátorem, na obr. 2 je zakresleno zjednodušené liniové schéma kompenzátoru. Samotný kompenzátor je tvořený měničem, třífázovým napěťovým střídačem z tranzistorů IGBT, dále kondenzátorem jako akumulátorem energie a tlumivkou  $X_R$ , tvořící filtr pro zajištění potřebného sinusového průběhu proudu. Napětí na kondenzátoru střídače je řízením udržováno na velikosti, která musí být vždy vyšší než vrcholová hodnota síťového napětí.

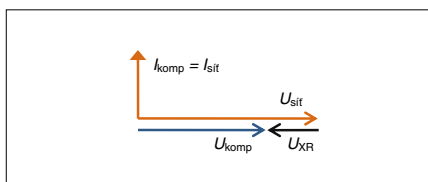
Řízení tranzistorů měniče kompenzátoru pulzně šířkovou modulací je podobné jako řízení měniče frekvence. Tranzistory IGBT jsou spínány tak, aby měnič kompenzátoru generoval napětí, které přes vazební reaktanci  $X_R$  (tlumivka) vyvolá požadovaný proud tekoucí do sítě. Rozdíl je v regulátorech proudu a samozřejmě v nadřazených regulátorech – regulátoru napětí kondenzátoru a regulátoru jalového proudu. Zásadní rozdíl je také v tom, že měnič kompenzátoru musí pracovat synchronně se sítí. Synchronní chod s napětím sítě zajišťují synchronizační obvody.

Vektorové diagramy na obr. 3 a obr. 4 pomohou vysvětlit princip funkce kompenzátoru, kdy se jalový výkon řídí změnou amplitudy napětí kompenzátoru  $U_{komp}$ . Pokud je toto napětí vyšší než napětí sítě, vznikne na reaktanci  $X_R$  úbytek napětí se stejnou fází, jako má napětí kompenzátoru, a do sítě teče kapacitní proud – kompenzátor se chová jako kondenzátor. Při napětí kompenzátoru nižším, než je napětí sítě, je úbytek na reaktanci v opačném směru a také protékající proud má obrácený směr, a tedy induktivní charakter. Tyto dva stavy lze přirovnat k řízení jalového proudu změnou buzení synchronního generátoru. Přebuzením generátoru, tedy zvýšením jeho indukovaného napětí, se vy-

tváří kapacitní proud, čemuž analogicky odpovídá stav kompenzátoru STELCOM při generování vyššího napětí, než je napětí sítě. Naopak podbuzený generátor má indukované napětí snížené a vytváří induktivní jalový proud podobně jako kompenzátor s napětím nižším než napětí sítě.



Obr. 3. Vektorový diagram v režimu kapacitního proudu



Obr. 4. Vektorový diagram v režimu induktivního proudu

Měnič generující napětí  $U_{komp}$  však může vytvářet i nesinusový tvar napětí, obsahující definované harmonické složky. Kompenzátor v tomto případě kromě odběru nebo dodávky jalového proudu umožňuje i generování harmonických proudů. Chová se jako aktivní filtr a je schopen odstranit nežádoucí harmonické proudy tím způsobem, že vygeneruje shodné složky proudu, ale opačného směru a dodá je do sítě.

### 4. Řízení kompenzátoru a komunikace s PDS

Z podmínek uvedených v Příloze 4 PPDS vyplývá jednoznačný požadavek na možnost dálkového řízení napěťových poměrů (řízení  $U$ ,  $Q$  či  $\cos \varphi$ ) v předávacím místě provozovatelem distribuční soustavy. Pracovníci PDS tak mají možnost komunikovat s řídicí jednotkou instalovanou v předávacím místě zdroje a zadávat požadované parametry. Komunikace mezi PDS a zdrojem je obousměrná. Na jedné straně řídicí jednotka ovládající kompenzátor jalového výkonu (STELCOM) přijímá požadavky ze strany PDS na řízení

$U$ ,  $Q$  či  $\cos \varphi$ , na straně druhé předává distributorovi informaci o aktuálních regulačních možnostech zdroje s ohledem na velikost vyráběného výkonu.

Způsob řízení kompenzátoru tedy umožňuje zcela autonomní řízení tak, aby byly splněny body a) až d) v kapitole 1, nebo povolení dálkového řízení.

Na obr. 5 je znázorněna závislost napětí v připojovacím bodě sítě nebo zvoleném uzlu sítě na regulovaném jalovém výkonu kompenzátoru STELCOM.

Pokud je potřeba komunikovat s řídicím systémem PDS, je možné STELCOM připojit buď přes síť Ethernet, nebo přes GSM modul a komunikovat pomocí protokolů, používaných v DS podle standardů IEC 60870-5-104 nebo IEC 61850.

### 5. Jak kompenzátor dimenzovat

Správné nadimenzování jakéhokoliv zařízení je vždy důležité. Jednak proto, aby systém perfektně fungoval a jednak, aby splňoval i ekonomické požadavky, tedy co nejnižší možnou cenu.

Přesto, že je možné u každého typu regulátoru jalového výkonu STELCOM ve výrobní řadě uvádět výkon, je v tomto případě vhodnější uvést výrobní řadu vztaženou na příslušný výkon transformátoru, přes který je FVE připojena do sítě vn. Výkonová řada distribučních transformátorů je typizovaná, a proto je k těmto transformátorům sestavena také výrobní řada zařízení STELCOM.

Sestavení výrobní řady zařízení STELCOM má čistě praktický důvod. Projektanti nemusí složitě počítat potřebný jalový výkon a snažit se o cenovou optimalizaci, někdy se zbytečnými riziky, že nebude k dispozici výkonová rezerva. Podle výkonu distribučního (připojovacího) transformátoru jednoduše zvolí zařízení STELCOM z výrobní řady a podle proudu a rozměrů rozváděčů vyprojektují připojení a umístění zařízení do rozvodny FVE. Je důležité, aby byl regulátor STELCOM umístěn co nejbližší k distribučnímu transformátoru kvůli nižšímu dimenzování přívodních vodičů k FVE a snížení ztrát ve vedení.

Dále je třeba si uvědomit, že původně pouze činný výkon přenášený přes transfor-

mátor do sítě se při regulaci jalového výkonu pomocí kompenzátoru STELCOM změní ve výkon zdánlivý, který se při maximálním jalovém výkonu kompenzátoru zvětší o 5,3%. Z toho důvodu se sníží velikost připojitelného činného výkonu FVE (viz tabulka). Tato skutečnost má dost podstatný vliv na optimální rozdělení jednotlivých sekcí FVE, optimální volbu celkového výkonu FVE a výkonů jednotlivých transformátorů.

## 6. Doplňující funkce elektronického kompenzátoru

### 6.1. Regulace $\cos \varphi$

Jak bylo vysvětleno v kapitole 2, zařízení STELCOM je v podstatě výkonový generátor proudu s možností regulace jeho velikosti a směru toku proudu první harmonické v oblasti kapacitní nebo induktivní. Jeho základní vlastností je tedy regulace účinnosti  $\cos \varphi$ .

### 6.2. Filtrace harmonických

Další doplňující funkce zařízení STELCOM více souvisí s celkovými požadavky na kvalitu napětí v síti. V případě, že je napětí sítě zkresleno harmonickými, je možné pomocí rozšířené funkce kompenzátoru přejít do potlačení některých harmonických, a tím vylepšit tzv. opravdový účinník označovaný  $\lambda$ . Zařízení se pak chová současně jako paralelní aktivní filtr, který eliminuje deformační výkon v síti.

### 6.3. Snížení flikru

Jednou z doplňujících funkcí zařízení STELCOM je možnost zmírnění flikru (blikání) v napájecí síti. Sofistikovaný systém regulace ve sledovaném uzlu sítě umožňuje v rámci výkonových možností daného zařízení zmírnit nepříjemný flikr, a tím splnit provozovateli DS např. jednu z podmínek standardu ČSN EN 50160.

### 6.4. Symetrizace proudu

Poslední doplňující funkcí zařízení STELCOM je možnost zajistit symetrii odebíraného proudu. To může mít např. velký význam u FVE, které se skládají s většího počtu jednofázových měničů. Zde je pak vhodné využít tuto doplňující funkci k dodatečnému zajištění symetrického odběru proudu v třífázové soustavě.

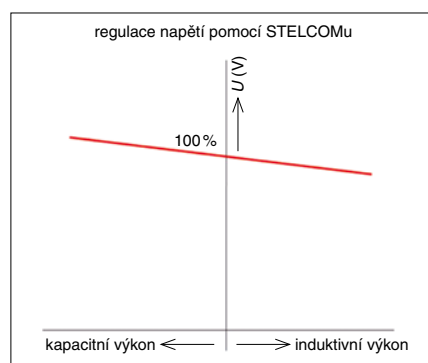
### 6.5. Stabilita napětí

Je zřejmé, že všechny předchozí vlastnosti v souhrnu znamenají vylepšení kvality napětí v napájecí síti.

## 7. Výhody a nevýhody zařízení STELCOM

Chceme-li zhodnotit výhody a nevýhody zařízení STELCOM, je nutné se nejprve zamyslet nad tím, jakým způsobem lze splnit podmínky pro připojení do DS uvedené

v kap. 1. Uvažujeme-li pouze FVE, tak je zřejmé, že při použití standardních měničů frekvence dodává FVE pouze činný výkon. Tento činný výkon pak musí dodávat ještě s maximální účinností, je to základní kritérium ekonomické rentability investice. Proto jsou měniče určené pro FVE optimalizovány a využívají tzv. MPP trackeru, tj. elektronického zařízení, které nastavuje pracovní bod střídačů tak, aby odpovídal aktuálnímu bodu maximálního výkonu připojených panelů. Jsou-li vlastnosti zařízení STELCOM „implantovány“ do takovýchto střídačů, tak to je samozřejmě vždy na úkor vlastní účinnosti FVE.



Obr. 5. Závislost regulovaného napětí na změně jalového výkonu STELCOMu

V případě, že by bylo třeba splnit požadavky regulace jalového výkonu známými dostupnými prostředky, tedy např. pomocí stupňovitě spínaných kompenzačních kondenzátorů a stupňovitě spínaných dekompenzačních tlumivek, tak nebude možné regulovat jalový výkon plynule, nehledě na výrazné zvětšení ztrát celého systému při dekompenzaci.

V případě použití známého principu označovaného jako SVC a TCR, tedy spínané kondenzátory a fázově řízený proud tlumivkou, tak sice lze plynule regulovat jalový výkon od kapacitní do indukční oblasti, ale do sítě budou generovány harmonické proudy, v důsledku čehož se podstatným způsobem zvýší ztráty celého systému. Velká nevýhoda takto zvolené regulace jalového výkonu je, že ztráty jsou největší při minimálním kompenzačním proudu.

Oproti oběma vyjmenovaným způsobům jsou ztráty kompenzátoru STELCOM úměrné kompenzačnímu proudu, tedy při nulovém kompenzačním proudu, jsou téměř zanedbatelné. Jediná nevýhoda zařízení typu STELCOM spočívá v jeho relativně vysoké ceně, je-li přepočítána na jednotku instalovaného jalového výkonu.

## 8. Možnosti využití principu kompenzátoru i v průmyslových sítích

Pozorného čtenáře jistě napadne, že principu zařízení STELCOM by šlo využít

i v průmyslových sítích, zejména tam, kde jsou kladeny vysoké nároky na rychlost regulace jalového výkonu, filtraci harmonických a celkové vysoké požadavky na zajištění kvality napájecího napětí. Zmiňované zařízení v kapitole 2, známé pod názvem STATCOM, se v průmyslových sítích běžně používá. Jedná se většinou o kompenzační výkonových zařízení, jako jsou obloukové pece, napájení válcoven apod. Zařízení STATCOM je nasazováno do průmyslové sítě v případě, že už není jiná možnost, jak zajistit jinými prostředky připojovací podmínky průmyslové sítě do sítě vn nebo vvn. Vždy se jedná o velké zvýšení celkové ceny investice.

Stejně cenové omezení v případě použití zařízení STELCOM platí i pro průmyslové sítě nízkého napětí.

## 9. Závěr

Zařízení STELCOM je ve svém principu nepostradatelným prvkem pro realizaci rozptýlených zdrojů elektrické energie s instalovaným výkonem nad 400 kW připojovaných do distribuční sítě vn. STELCOM je určen jako doplněk k zařízení FVE, kde měniče nemají schopnost pracovat s požadovaným účinníkem a neumí komunikovat s řídicím systémem distribuční soustavy, nebo jako doplněk regulace účinníku u jiných rozptýlených zdrojů elektrické energie, které tuto možnost také nemají.

Je to jeden z prvních speciálních výrobků, který zajistí splnění požadavků na připojení rozptýlených zdrojů do DS. Reguluje jalový výkon v předepsaném rozsahu a komunikuje s nadřazeným řídicím systémem DS podle požadovaných světových a evropských standardů.

Zvládnutí výkonové elektroniky umožňuje konstruovat nejenom popsané zařízení typu STELCOM, ale mnohem sofistikovanější systémy.

Pro zajištění kvality elektřiny v sítích nn to jsou např. elektronické setrvačníky, které kromě regulace jalového výkonu dokážou také krátkodobě akumulovat elektrickou energii a dodávat špičkově činný výkon. Dále to jsou již delší dobu vyráběné linkové kondicionéry, které výrazným způsobem zlepšují kvalitu elektřiny v odlehlých napájecích bodech sítě.

V poslední době tolik diskutované *Smart Grids*, které v základu změní pojetí distribučních sítí a jejich provozování, budou vyžadovat výkonové prvky nejenom pro regulaci jalového výkonu, ale i pro inteligentní akumulaci elektrické energie apod.

Cílem bude snižování ceny a ztrát těchto výkonových elektronických zařízení za současného zvyšování úrovně spolehlivosti.

Více informací je možné nalézt na webových stránkách:

<http://www.elcom.cz>