

## Spôsobý kompenzácie reaktančného výkonu vo fotovoltaických elektrárnach

Koníček Michal · Elektrotechnika

09.09.2013



Príspevok je zameraný na teoretickú analýzu potenciálnych možností vzniku reaktančného výkonu. Zameriava sa na nežiaduce vplyvy pôsobiace na fotovoltaickú elektráreň, ktoré môžu spôsobiť vznik reaktančného výkonu. Popísané sú najdôležitejšie časti fotovoltaickej elektrárne, ktoré môžu byť zdrojom indukčného alebo kapacitného reaktančného výkonu. V príspevku sú zhrnuté spôsoby kompenzácie reaktančného výkonu a dôvody prečo je potrebné kompenzovať tento výkon. Podrobne sú opísané základné typy v súčasnosti najpoužívanějších kompenzačných zariadení reaktančného výkonu vo fotovoltaických elektrárnach a ich začlenenia do systému.

### 1. Úvod

V poslednom období sa v energetickom mixe mnohých krajín výrazne zmenil podiel obnoviteľných zdrojov energie. Vzostup inštalovaného výkonu týchto zdrojov bol zaznamenaný aj v Slovenskej republike, pričom najväčšie zastúpenie patrí fotovoltaickým elektrárnach. História už v mnohých prípadoch ukázala, že nárazové zmeny so sebou neprinášajú iba pozitíva, ale tiež negatívne aspekty. V súvislosti s dynamickým nárastom podielu fotovoltaických elektrární sa ukázalo, že prevádzka týchto zdrojov prináša viacero problémov, ktoré je potrebné riešiť. Cieľom príspevku je ozrejmienie niektorých nežiaducich vplyvov a častí fotovoltaických elektrární, ktoré sú zdrojmi reaktančného výkonu a priblížiť vybrané spôsoby kompenzácie reaktančného výkonu vo fotovoltaických elektrárnach (FVE), ktoré sú v súčasnosti vysoko aktuálne.

### 2. Vznik reaktančného výkonu vo FVE

Reaktančný výkon je spôsobený tým, že elektrická energia v jednej časti periódy v kondenzátore vytvára elektrické pole a v cievke magnetické pole, v druhej časti periódy potom tieto polia zanikajú a rovnakú energiu vracajú do obvodu. Podľa toho, či má záťaž indukčný alebo kapacitný charakter, môže aj reaktančný výkon nadobudnúť obe znamienka: ak sa prúd oneskoruje za napätím ide o reaktančný výkon s indukčným charakterom (kladný), v opačnom prípade ide o reaktančný výkon s kapacitným charakterom (záporný) [1][2].

Pri prevádzke FVE vzniká problém. Prevádzkovatelia FVE sú povinný dodržať požadované pásma účinníka elektrickej energie v rozmedzí 0,95 až 1 induktívneho charakteru a nevyžiadaná dodávka reaktančného výkonu do DS. Pri návrhoch

mnohých FVE sa bral do úvahy fakt, že striedače FVE pracujú s jednotkovým účinníkom. Striedače pracujú s týmto účinníkom iba v určitej výkonovej oblasti. Taktiež ostatné súčasti FVE ako sú káblové rozvody (NN / VN) alebo samotný transformátor majú výrazný vplyv na tento výkon. Veľký význam na FVE majú aj nežiaduce vplyvy pôsobiace na vyrábaný výkon elektrárne. [3]

## 2.1 Nežiaduce vplyvy pôsobiace na FVE

FVE sú väčšinou netienené blízkymi objektmi alebo stromami. K nežiaducim vplyvom, preto dochádza najmä zmenou vplyvu teploty, vplyvu prechádzajúcich oblakov, nerovnomernosti záťaže z vedľajších vplyvov ako nečistoty, lístia, prachu, snehu a iné. Použitím vhodnej optimalizácie je tak možné dosiahnuť skoro 100% výťažnosti inštalovanej kapacity FVE. Správnou optimalizáciou, a to nasadením optimalizačných systémov a pravidelnou starostlivosťou o FVE ako kosenie trávy, umývanie panelov a inými, sa dokáže zlepšiť výnos o 4 až 7% [4].

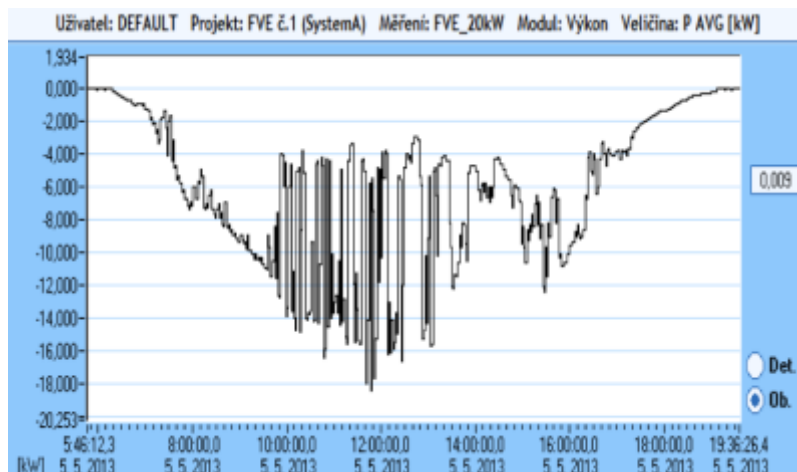
**Rozdiely v elektrickej charakteristike jednotlivých panelov** - Rozdielna impedancia jednotlivých panelov spôsobuje úbytok energie vyrobenej panelmi pri odovzdávaní tejto energie smerom k striedaču. [4].

**Vplyv teploty** - S rastom teploty výrazne klesá napätie jednotlivých panelov čím klesá aj výstupný výkon panelu. Rozdiel v teplote pritom môže byť veľmi rozdielny aj medzi panelmi jedného stringu [4].

**Pôsobenie poškodenej by-pass diódy** - Na panely sa nachádzajú väčšinou 3 by-pass diódy. Pokiaľ dôjde k poruche jednej z nich, tak dôjde k výraznému poklesu napätia i výkonu daného panela o cca jednu tretinu. Tento pokles má následne vplyv na všetky panely v stringu. [4]

**Nerovnomerný sklon panelov** - Tento jav sa týka všeobecne všetkých inštalácií, kde nie je možné dodržať rovnaký sklon panelov. Už rozdiel jeden stupeň v sklone spôsobí rozkmitanie systému, predovšetkým v krajných polohách (v skorých ranných a neskorých popoludňajších hodinách) [4].

**Vplyv prechádzajúceho mraku** - spôsobuje veľké zmeny pri výrobe celej FVE alebo jednotlivých stringov. Zatienie panelov prechádzajúcim mrakom spôsobí náhly úbytok výroby a následné odtienenie skokovú zmenu nárastu výroby celej FVE alebo jednotlivých stringov [4]. Takéto správanie oblačnosti znázorňuje Obr. 1. Pri tak častej zmene vyrábaného činného výkonu sa skokovo mení aj reaktančný výkon, ktorý je následne ťažko kompenzovateľný. Takéto správanie má potom významný vplyv na ročný objem dodanej energie [5].



Obr. 1. Vplyv prechádzajúceho mraku na výrobu činného výkonu FVE (záporné číslo je dodávka do siete)

## 2.2 Zdroje reaktančného výkonu vo FVE

Prevádzkovateľom FVE je fakturovaná platba za nevyžiadajú dodávku reaktančného výkonu (Q) alebo za nedodržanie účinníka. Nevyžiadajú dodávka Q do siete je najmä v režime, keď FVE nedodáva činný výkon, čiže v noci. Je to spôsobené prvkami ktorými je tvorená FVE. [5].

**Transformátor** - Z pohľadu reaktančného výkonu je to statická induktívna záťaž, ktorá potrebuje na vytvorenie magnetického poľa Q. Transformátor v stave naprázdno odoberá zo siete malý prúd, ktorého reaktančná zložka tiež magnetuje železo. Tento stav je hlavne v noci a tak FVE spotrebovávajú Q. Chod transformátora naprázdno sa rieši statickou individuálnou kompenzáciou, ktorá je daná prevádzkovateľovi distribučnej siete. Znárodňuje hodnotu kondenzátorov ku konkrétnym výkonom transformátorov. Transformátor tvorí záporný príspevok k celkovému kapacitnému Q FVE [6].

**Individuálna kompenzácia transformátora** - Z pohľadu reaktančného výkonu je to statická kapacitná záťaž (inštalovaný kondenzátor). Statická kompenzácia transformátora tvorí kladný príspevok k celkovému kapacitnému Q FVE [6].

**NN vedenie** - Z pohľadu reaktančného výkonu je to kapacitná záťaž, ktorá potrebuje nabíjajúci prúd pre udržiavanie káblov pod napätím. NN vedenie použité na pospájanie panelov a stringov má minimálny vplyv tak isto ako aj vyvedenie výkonu z jedného striedača. Významne sa presadzuje v prípade necentrálnych striedačov a pri striedačoch, ktoré sú veľmi vzdialené od transformátorov. NN vedenie tvorí kladný príspevok k celkovému kapacitnému Q FVE [6].

**Striedače** - Z pohľadu reaktančného výkonu je to kapacitná záťaž. Záleží to hlavne od výrobcu a typu striedača. Striedače tvoria kladný príspevok k celkovému kapacitnému Q FVE. Preto sa v menších FVE zvyknú striedače vypínať na noc a tým aj FVE [6].

**VN vedenie** - Z pohľadu reaktančného výkonu je to kapacitná záťaž, ktorá potrebuje nabíjajúci prúd pre udržiavanie káblov pod napätím. VN vedenie tvorí kladný príspevok k celkovému kapacitnému Q FVE. Pri veľkých FVE s veľkými dĺžkami VN káblov to môže byť značne veľká hodnota, ktorá sa musí kompenzovať. Kompenzujú sa statickou

indukčnou kompenzáciou [6].

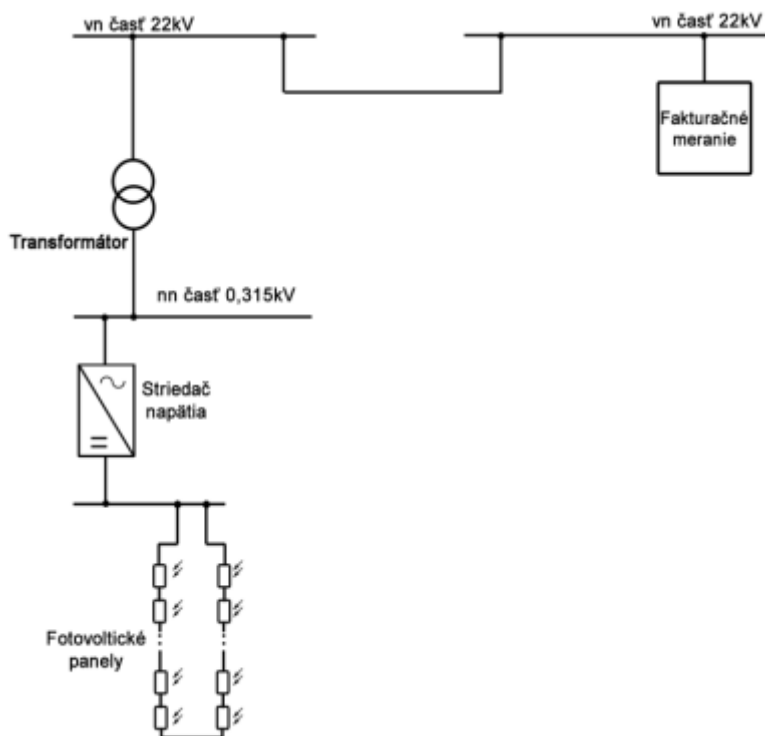
**Individuálna kompenzácia kapacitného Q** - Z pohľadu reaktančného výkonu je to statická indukčná záťaž (inštalovaná tlmivka). Statická kompenzácia transformátora tvorí záporný príspevok k celkovému kapacitnému Q FVE [6].

Z prehľadu jednotlivých častí FVE je zrejmé, že prevažujú kapacitné záťaže a významnejšiu indukčnú záťaž tvoria transformátory. Nabíjacie prúdy káblov sa pohybujú vo veľmi malých hodnotách (jednotiek ampéra). Na VN hladine sa nesmú zanedbávať. Napríklad pri napätí 22 kV každý jeden ampér znamená 38 kVAr kapacitného Q (trojfázové). Ten je potom nameraný na obchodnom meraní distribútora. Keď je vo FVE nadmerné množstvo kapacitného Q môže sa to odraziť na faktúre za nevyžiadajú dodávku do siete. Taktiež sa nesmie zabúdať na indukčné záťaže kvôli ktorým bude FVE platiť sankcie za nedodržanie účinníka [6].

### 3. Spôsob kompenzácie reaktančného výkonu vo FVE

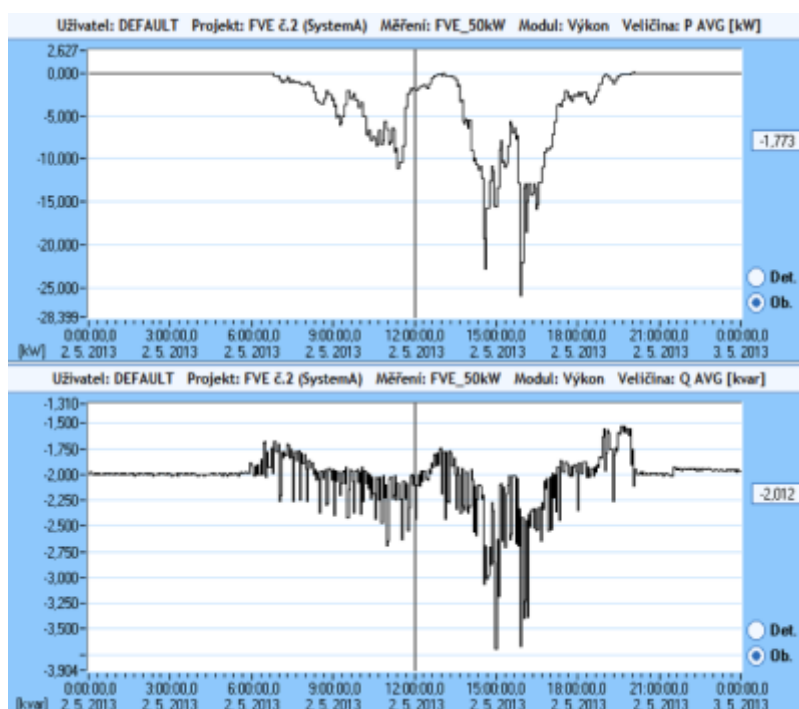
Hlavným dôvodom začleňovania kompenzácie do FVE je dodržanie účinníka ( $\cos \varphi$ ) v mieste pripojenia do Distribučnej siete (DS) alebo zamedzeniu nežiadanej dodávky Q do DS. Dodržanie neutrálneho účinníka sú podstatné pre reguláciu napätia v DS. Pri súčasnom usporiadaní a prevádzky elektrizačnej sústavy ide paradoxne proti výrobe z FVE a spotreba elektrickej energie, teda v čase keď je najmenšia spotreba, tak je najväčšia výroba z FVE. Cieľom je vygenerovať čo najviac činného výkonu v čase (teda energie), za ktorú dostane prevádzkovateľ zaplatené. Ideálne riešenie kompenzácie je možné navrhnúť až pri konkrétnej fungujúcej fotovoltaickej elektrárni. [7].

Prevádzkový režim FVE sa počíta v rozmedzí 900 až 1100 hodín v roku. To znamená, že elektrárň je prevádzkovaná s minimálnym činným výkonom (alebo so žiadnym). V prípade malých tokov činného výkonu nemusí byť neutrálny účinník (0,95 - 1 indukčný) dodržaný. Pomerne malé reaktančné výkony v porovnaní s veľkým inštalovaným výkonom FVE však nemožno podceňovať a treba FVE osadiť vhodným kompatibilným kompenzačným zariadením už v projekte. Často sa stáva, že reaktančný výkon vo FVE vykazuje vďaka dlhým káblovým vedením skôr kapacitný charakter čo je taktiež nežiaduce. Dochádza k nevyžiadanej dodávke kapacitného reaktančného výkonu do DS, ktorá je výrazne spoplatnená. To znamená, že prevádzkovateľ FVE môže platiť nemalé čiastky v čase keď elektrárň nevyrába [8]. FVE je RLC obvodom, ktorá má konkrétne hodnoty indukčnej a kapacitnej reaktancie. Vďaka týmto reaktanciám je realizovaná dodávka prípadne spotreba Q. Blokovú schému zapojenia FVE znázorňuje Obr. 2.



Obr. 2. Blokova schéma FVE

Treba si uvedomiť, že v bode fakturačného merania registruje DS reaktančnú energiu ako v čase výroby, tak v dobe spotreby elektriny FVE. Spotreba činnej elektriny je časový interval kedy FVE nevyrába žiaden činný výkon, takzvaný "sleeping mode". Príklad toku výkonov počas jedného dňa s premenlivou oblačnosťou FVE je na nasledujúcom Obr. 3. [8][9].



Obr. 3. Priebeh činného a reaktančného výkonu v bode fakturačného merania FVE v priebehu jedného dňa s premenlivou oblačnosťou (záporne je dodávka do distribučnej siete)

Z obrázku je zrejmé, že nevyžiadaná dodávka reaktančného výkonu v čase, keď

elektrárň nevyrába elektrinu, je takmer konštantná. Počas premennej výroby (premenlivá oblačnosť) je dodávka reaktančného výkonu silne rozkmitaná. Regulácia veľkosti  $Q$  podľa predpísanej požadovanej hodnoty účinníka, musí pri návrhu kompenzácie alebo dekompenzácie rátať aj s takýmito priebehmi [8]. Na reguláciu reaktančného výkonu sa používajú kompenzačné zariadenia v nasledujúcich podkapitolách.

### 3.1 Využitie existujúcich striedačov

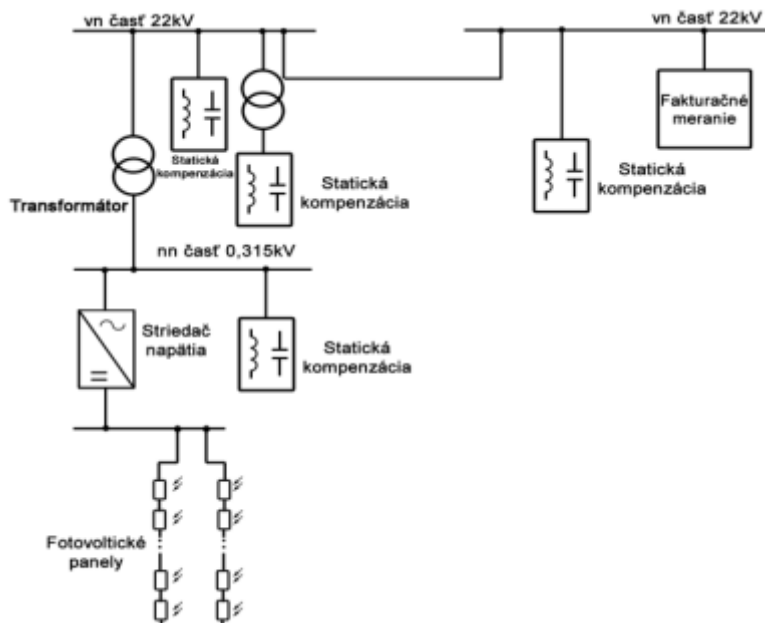
Technicky najjednoduchší spôsob regulácie  $Q$  vo FVE je využiť priamo už inštalovaný striedač. Na tento účel sú však vyhovujúce všetky, a preto závisí od ich konštrukcie. Pri väčšine výrobcov sa uvádza garantovaná regulácia reaktančného výkonu. Nie vždy to dokážu striedače sami. Sú podmienené dodatočnými technickými úpravami alebo inštaláciou softvérového vybavenia. Takéto zásahy predstavujú dodatočne náklady pre výrobcu. Z toho vyplýva, že je nutné doplnenie riadenia. Referenčným bodom pre toto riadenie je fakturačné meranie. Na niektorých FVE je použité stabilné nastavenie zjednodušených algoritmov. Takéto nastavenie sa vykonáva na základe ručne dopočítanej potreby reaktančného výkonu. Je to takzvané náhradné lokálne riešenie [8].

Problémom regulácie  $Q$  pomocou striedačov býva prúdová rezerva na reguláciu. Ak boli prúdovo dimenzované na maximálnu hodnotu činného výkonu a takto sú aj prevádzkované tak regulácia je veľmi problematická. Striedač na reguláciu potrebuje 5% zvýšenie prúdu čo je pri plnom zaťažení činného výkonu veľmi zložitú. Ponúka to len veľmi málo výrobcov. Kompenzácia striedačom nerieši všetky stavy FVE ako "sleeping mode" alebo prevádzku pri nízkom činnom výkone (prípadne veľmi premenlivom).

### 3.2 Využitie statických kompenzačných prostriedkov

Statické kompenzačné prostriedky sa vyhotovujú dvoma spôsobmi. Statickou kompenzáciou kondenzátorom alebo tlmivkou a statickou kompenzáciou so stupňovito spínanými kompenzačnými prostriedkami (kondenzátory a tlmivky). Týmito aplikáciami sa hlavne rieši nevyžiadaná dodávka  $Q$  v noci ako aj riadenie  $Q$  na základe požadovanej hodnoty účinníka. Spínanie môže byť realizované kontaktne, ale aj bezkontaktne avšak vždy iba stupňovito. Tieto kompenzačné (dekompenzačné) zariadenia je možné pripojiť na VN aj NN.

Rozhodujúcim faktorom miesta zapojenia sú priestorové možnosti, požiadavky na rozsah a rýchlosť regulácie a cena jednotlivých komponentov (kondenzátorov, tlmiviek, spínacích prvkov, istiacich prvkov a iné) a technické možnosti pripojenia. V niektorých prípadoch kompenzačných zariadení je potrebné inštalovať aj transformátor. Obr. 4. znázorňuje blokovú schému možností zapojenia do FVE [8].

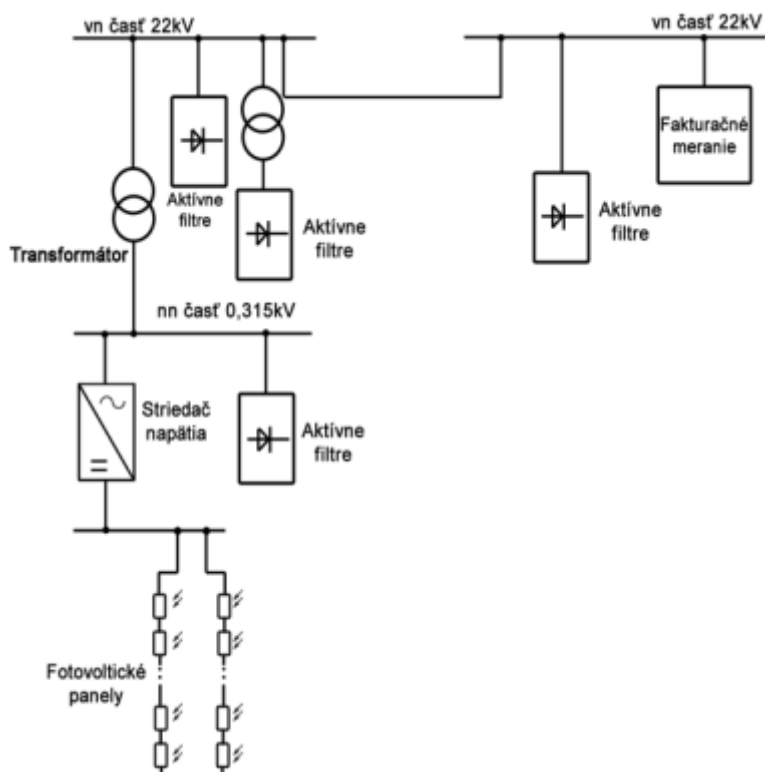


Obr. 4. Bloková schéma FVE s rôznymi možnosťami zapojenia statickej kompenzácie

Doplnenie týchto zariadení si niekedy vyžaduje nové kapacity čo niekedy vedie až k stavebným úpravám. V niektorých aplikáciách ich nie je možné doplniť. Výhodou sú nízke straty v kondenzátoroch. Straty v tlmivkách a transformátoroch je možné ovplyvniť ich dimenzovaním. Nevýhodou je už spomínané priestorové nároky a princíp regulácie. Regulácia je vždy stupňovitá čo vzhľadom na prevádzkové režimy FVE je niekedy nevyhovujúce. Vzhľadom k tomu, že sa jedná o dopĺňovanie kapacít a indukčností do silovej schémy FVE, môžu byť v niektorých prevádzkových režimoch veľkým problémom rezonančné javy budené harmonickými generovanými strieďačmi [8].

### 3.3 Aktívne filtre

Zaujímavým riešením je použitie paralelných aktívnych filtrov. Vyhovujú všetkým prevádzkovým režimom FVE. Ich rozmery sú veľmi malé a sú nenáročné na priestor. Dajú sa realizovať na VN aj NN hladine ako to je znázornené na Obr. 5. [8].



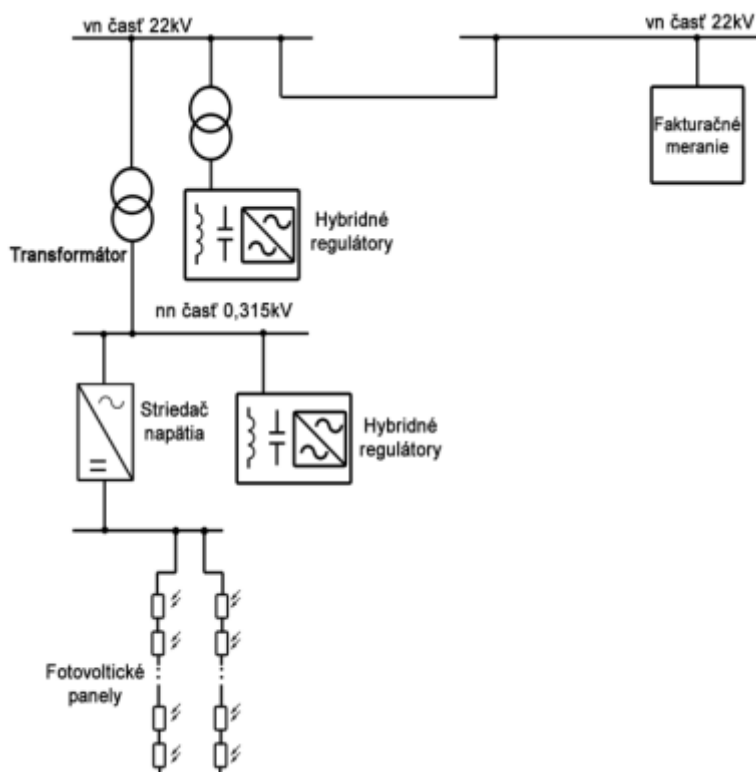
Obr. 5. Bloková schéma FVE s rôznymi možnosťami zapojenia kompenzácie pomocou aktívnych filtrov

Nevýhodou je ich vyššia cena a u nízkonapäťových variantov aj vyššie straty. Aktívne kompenzačné zariadenia dokážu riadiť  $Q$  kontinuálne oproti statickým, ktoré ho riadia stupňovito. Dokážu presnejšie udržiavať riadený výkon.

### 3.4 Hybridné regulátory reaktančného výkonu

Dobрым technickým riešením hybridné regulátory reaktančného výkonu. Hybridný regulátor kombinuje aktívny a pasívny spôsob generovania reaktančného prúdu. Kombináciou statických a aktívnych častí sa dosiahlo zníženie investičných nákladov a vzhľadom k nižším stratám aj čiastočne prevádzkových nákladov. Z technického hľadiska je dosiahnutá vysoká dynamika a plynulosť regulácie. Odstránili sa tým všetky nevýhody čisto spínanej regulácii  $Q$  [10]. Ich hlavnými časťami sú niekoľko málo stupňov kondenzátorov a tlmiviek a paralelne pripojený menič. Ekonomicky výhodnejšie je ich aplikácia na NN napätí, buď na NN strane transformátorov jednotlivých sekcií FVE, alebo na NN strane samostatného transformátora. Jednotlivé aplikácie sú znázornené na Obr. 6. [8].





Obr. 6. Blokova schéma FVE s rôznymi možnosťami zapojenia kompenzácie pomocou hybridných regulátorov.

Hybridné kompenzačné zariadenia sa dimenzujú podľa výkonu transformátora príslušnej sekcie FVE. Jeho cena je porovnateľná so statickými kompenzačnými prostriedkami. Výhodou je plné pokrytie potreby reaktančného výkonu pre dosiahnutie vyžadanej hodnoty účinníka [8].

#### 4. Záver

V príspevku je pozornosť zameraná na teoretickú analýzu potenciálnych možností vzniku reaktančného výkonu. Popísané sú niektoré zariadenia, ktoré môžu byť zdrojom reaktančného výkonu s opisom vplyvov pôsobiacich na prevádzku fotovoltickej elektrárne. V druhej časti sú analyzované spôsoby kompenzácie reaktančného výkonu, kde sú podrobne opísané vybrané základné typy a v súčasnosti najpoužívanejšie kompenzačné zariadenia so spôsobmi ich aplikácie determinované výhodami respektíve nevýhodami. Je záujmom prevádzkovateľov fotovoltických elektrární eliminovať nadmernú produkciu respektíve spotrebu reaktančného výkonu. To za určitých podmienok môže priniesť prevádzkovateľom úsporu svojich financií.

#### Podakovanie

Tento článok vznikol vďaka podpore v rámci OP Výskum a vývoj pre projekt Efektívne riadenie výroby a spotreby energie z obnoviteľných zdrojov (Energoz), ITMS 26240220028, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.



Európska únia  
Európsky fond regionálneho rozvoja



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/  
Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ

## Literatúra

1. TIRPÁK, A. Elektromagnetizmus. - Druhá upravená verzia - Bratislava : Katedra rádiofyziky, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského, Bratislava, 2004, 717 s, ISBN 80-88780-26-8.
2. Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption, Federal Energy Regulatory Commission, Staff Report, Docket No. AD05-1-000, Washington. 2005. [online]. Dostupné na internete:  
<http://www.ferc.gov/eventcalendar/files/20050310144430-02-04-05-reactive-power.pdf>
3. Reactive energy compensation, Industrial electrical network design guide, Schneider Electric. Dostupné na internete:  
[http://www.engineering.schneider-electric.se/Attachments/ed/guide/07\\_reactive%20energy%20compensation.pdf](http://www.engineering.schneider-electric.se/Attachments/ed/guide/07_reactive%20energy%20compensation.pdf)
4. Faktory Faktory ovplyvňujúci negatívne činnosť solárnej elektrárny, SUNLUX, s.r.o., 2010, Dostupné na internete:  
<http://www.scribd.com/doc/44757850/Faktory-ovliv%C5%88ujici-%C4%8Dinnost-solar-ni-elektrarny>
5. KAŠPÍREK, M. Dopad OZE na provoz distribučních NN sítí. In 9th International Conference : Control of Power Systems. Tatranské Matliare High Tatras : FEI STU, 2010. p. 1-7.
6. GÖTZ, M. Řízení účinníku a kompenzace jalového výkonu na FVE. Dostupné na internete:  
<http://www.solartechnika.sk/solartechnika-12010/rizeni-uciniku-a-kompencace-jaloveho-o-vykonu-na-fve.html>
7. KORENC, V., BŮBELA, T. Problematika regulace jalového výkonu u fotovoltaických elektráren. Odborný článek firmy ELCOM, a.s. 2012. Dostupné na internete:  
<http://www.elcom.cz/files.php?id=/5/download/problematika-regulace-jaloveho-vykonu-u-fotovoltaickych-elektraren.pdf>
8. HOLOUBEK, J. Fotovoltaické elektrárny a jalový výkon. X. Konference: Energetické rušení v distribučních a průmyslových sítích. Brněnská přehrada: ELCOM, a.s.
9. DIXON, J., MORAN, L., RODRÍGUEZ, J., DOMKE, R. Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review, Proceedings of the IEEE, Volume: 93, Issue: 12, 2005, pp. 2144-2164, ISSN 0018-9219. Dostupné na internete:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1545768>
10. KORENC, V., BŮBELA, T. Hybridní regulace jalového výkonu fotovoltaických elektráren. X. Konference: Energetické rušení v distribučních a průmyslových sítích. Brněnská přehrada: ELCOM, a.s.

---

Spoluautormi článku sú doc. Ing. Beláň Anton, PhD., Ing. Boris Cintula, Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave

---

