

Druhy fotovoltaických systémů a jejich zapojení.

Vliv konkrétního zapojení na návratnost (ekonomiku) provozování.

Ing. Petr Maule, LL.M., MBA, Česká fotovoltaická asociace (ČFA)
maule@cefas.cz www.cefas.cz

V článku jsou popsány základní druhy zapojení síťových fotovoltaických systémů. Využití vyrobené elektřiny z fotovoltaických zdrojů můžeme vyhodnocovat z hlediska technického, energetického, ekologického a ekonomického. Zejména ekonomickým aspektem je dnes nutno nahlížet na nově projektované instalace. V České republice se očekávaný rozvoj větších decentralních fotovoltaických zdrojů několik let zastavil, a proto podrobíme bližší technické analýze zejména střešní fotovoltaické systémy připojené k síti, které se objevují nejčastěji na trhu a jejich rozvoj podporuje Ministerstvo životního prostředí, prostřednictvím Státního fondu životního prostředí. Z provedené analýzy možných typů zapojení, objasnění výhod a nevýhod, bylo vypočteno i ekonomické vyhodnocení popisovaných řešení. Z legislativního důvodu fakturačního měření výroby a spotřeby elektřiny v České republice - po fázích, bylo nutno při výpočtech zohlednit i toto hledisko, které má podstatný vliv na ekonomiku FV systému. Zapojení s hybridním třífázovým asymetrickým střídačem a regulátorem přetoků na využití sekundárních přebytků elektřiny vychází proto nejlépe a je proto doporučeno v závěru jako nejlepší projektové řešení k návrhu a instalaci.

Stávající stav a legislativa v ČR

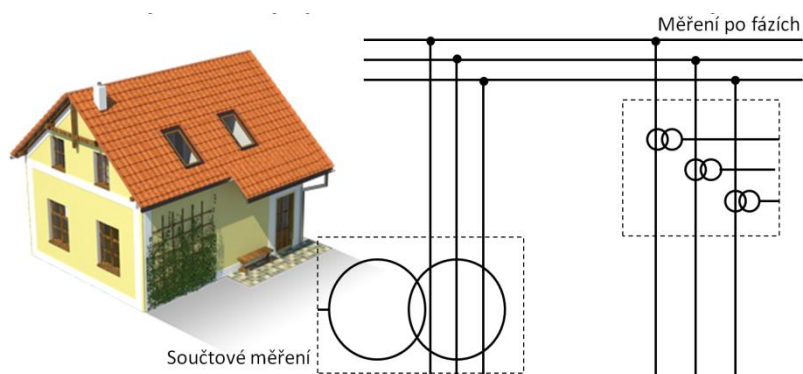
V České republice se plánovaný rozvoj v aktualizaci Státní energetické koncepce (ASEK) decentralních fotovoltaických zdrojů nedaří od roku 2014 správně nastartovat. Tempo určené v ASEK je naplňováno na úrovni 1 až 6 % plánu, a to instalacemi nejmenších střešních fotovoltaických instalací pro vlastní spotřebu u fyzických osob, s výkonem do 10 kW_p. Historicky vypsání dotace středních a velkých střešních fotovoltaických systémů byly jen malým kamenem hozeným do rybníka. V závěru letošního roku očekáváme vypsání III. výzvy OP PIK, ale ani tato poslední výzva ve stávajícím dotačním období podstatně, třebaže bude s výkonem do 1 MW_p, nezvrátí dosavadní vývoj podílu obnovitelných zdrojů (OZE) u nás. Využití vyrobené elektřiny OZE je zapotřebí vyhodnotit z hlediska technického, energetického, ekologického a ekonomického. Bližší technické analýze budou podrobeny střešní fotovoltaické systémy připojené k síti, které se objevují nejčastěji na vnitřním trhu.



Obr. 1: Rozdílné roviny (směry) při návrhu fotovoltaických systémů (reálný stav, ideální stav)

Technická řešení fotovoltaických systémů je důležité prozkoumat z několika směrů (rovin). Zaměříme se na rovinu užitečnosti, efektivnosti a ekonomiky. V rovině efektivního řešení není možné stavět nejmenší, zpravidla jednofázové systémy, neboť by byla silně oslabena rovina užitečnosti a ekonomiky. Naopak navrhneme-li systém pro maximální užitečnost, posílíme ekologickou rovinu, ztratíme však, značně ve směru ekonomiky. Výstavba jednoduchých výkonově nejmenších systémů dosahuje značný ekonomický přínos, avšak kulhá s efektivností a řízením. V praxi jsou často tyto

směry protichůdné, a proto je důležité se zaměřit na řešení podobného směru a obdobné orientace. Jedině tak vybereme ekonomicky nejlepší a vysoce návratná technická řešení.



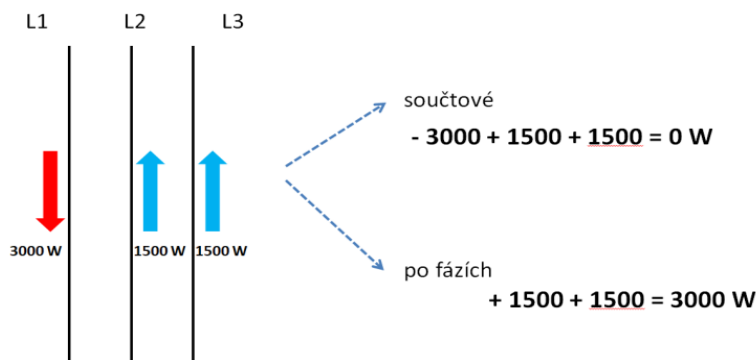
Obr. 2: Schéma měřicích systémů (elektroměrů) pro měření
vlevo - součtové měření, vpravo – měření po fázích

V České republice je důležité zapojit do ekonomického posuzování ještě i rovinu legislativní – měření elektřiny. Před připojením do sítě u nově postavených fotovoltaických systémů distributor vymění stávající fakturační měřidlo (elektroměr se součtovým měřením všech tří fází najednou) za nové fakturační měřidlo (elektroměr s měřením každé fáze samostatně). Zjednodušené schéma typů měření je na obr. 2. V drtivé převaze evropských zemí EU převažuje systém součtového měření, který je podle našeho názoru vhodnější pro aplikování zdroje na straně spotřebitele (zapojení je jednodušší, levnější). Z důvodu rozlišného způsobu měření bude docházet k menším či větším rozdílům (chyb) podle způsobu zapojení (3f/1f) a sestavy, složení, druhů a zapojení spotřebičů v objektu, využívání spotřebičů, zvyklosti domácnosti a počtu členů společně žijících, způsobu připojení zdrojů (3f/1f) a možnosti způsobu jejich řízení, způsobu využívání elektřiny pro účely přípravy TUV, vytápění, vaření, ... včetně způsobu regulace využití přebytků elektřiny (akumulace).

Výsledky měření spotřeby elektřiny

Jak jsme již zmínili, systém měření elektřiny je v ČR diametrálně odlišný. Na následujícím příkladu si ukážeme, jaké hodnoty naměří elektroměr v ČR a jaké hodnoty naměří elektroměry například v Německu.

Počáteční předpoklady jsou tyto. Výrobní elektřiny je připojena jednofázově (jednofázový měnič) do fáze L₁, aktuální výkon měniče je 3000 W. Ve fázi L₁ nemáme zapojen žádný spotřebič (odebíraný příkon je P₁= 0 W). Z fáze L₂ a L₃ odebíráme z každé příkon 1500 W (P₂=1500 W, P₃= 1500 W).



Obr. 3: Energetické toky a výsledek měření spotřeby elektřiny při různých typech měření

Při použití součtového měření vychází měřená spotřeba elektřiny:

$$P_{\text{celkem}} = P_1 + P_2 + P_3 = (-3000) + (+1500) + (+1500) = \mathbf{0 \text{ W}}$$

Při použití měření po fázích vychází měřená spotřeba elektřiny:

$$P_{\text{celkem}} = P_1 + P_2 + P_3 = (0) + (+1500) + (+1500) = \mathbf{3000 \text{ W}}$$

Použijeme-li součtové měření, je spotřeba v odběrném místě rovna nule. Při použití měření spotřeby po fázích, je výsledná hodnota spotřeby rovna 3000 W. Vyjádříme-li výpočet chyby měření celkové spotřeby matematicky, je **chyba měření 100 %** (vztaženo k součtovému způsobu měření).

Pro upřesnění modelu měření po fázích je nutno ještě doplnit, že kromě celkové naměřené spotřeby 3000 W (ve dvou fázích) je současně naměřena i hodnota přetoků do distribuční soustavy o výkonu 3000 W (v jedné fázi). Toto má však zásadní dopad při posuzování ekonomiky provozování fotovoltaických zdrojů z důvodu zcela odlišné ceny za přetok do distribuční soustavy.

Pohled na spotřebu metodikou MŽP SFŽP

Z metodického pokynu dotačního programu Nová zelená úsporám se spotřeba definuje jako spotřeba objektu v místě výroby. V podmínkách programu se hovoří o časovém profilu výroby a spotřeby, jenž má být přizpůsoben - bez vazby na způsob a metodiku měření spotřeby. To, že je měření vztaženo k objektu jako celku a dále metodika nerozlišuje, znamená v úvaze SFŽP jen součtové měření spotřeby, jako tomu je například u energetických auditů a posudků. Nahrává tomu i fakt, že stávající elektroměr měří vždy součtovým způsobem, protože není v objektu instalován dosud žádný zdroj.

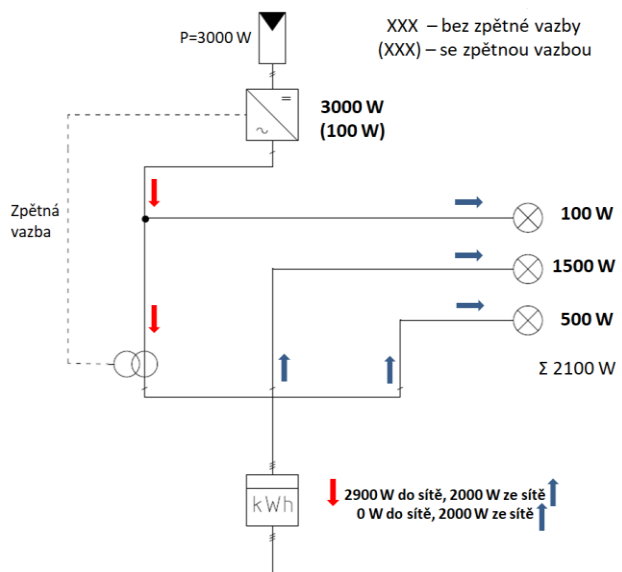
Právě v okamžiku vzniku a připojení nového zdroje, přestává režim součtového měření platit a distribuční společnost při žádosti o připojení do DS vymění elektroměr za nový (s měřením po fázích). Spotřeba objektu (domácnosti) je ve skutečnosti rozdělena ovšem nerovnoměrně, časově i průběhem chaoticky do jednotlivých fází. Na chvíli připusťme, že profil objektu (domácnosti) bude zcela shodný jako před výměnou elektroměru. Zapojením zdroje do objektu, však zcela na jedné, nebo na dvou, případně na všech třech fázích upraví výsledné hodnoty a v této chvíli **přestává platit pravidlo, že spotřebujeme 70 % vyrobené elektřiny – z důvodu změny měření při spotřebě elektřiny!**

Analýza jednotlivých druhů zapojení

Jednofázový FV systém (bez regulátoru)

Obrázek 4 ukazuje zapojení jednofázového fotovoltaického systému bez regulátoru. Fotovoltaické panely produkují výkon 3000 W. Střídač je zapojen do jedné fáze. V případě nepoužití zpětné vazby ke střídači dochází k přetoku do sítě 2900 W ($3000 - 100 = 2900$) a k současnému nákupu pro spotřebu 2000 W ($1500 + 500$) ze sítě do zbylých dvou fází. Zapojením dochází k ekonomickému znehodnocení vyrobené elektřiny u distribuční sazby D02 o 89 %. **Ekonomické využití elektřiny je v tomto případě pouhých 11 %.**

Zapojíme-li k měniči zpětnou vazbu, nevznikne žádný přetok do sítě. Měnič je výkonově omezen na 100 W a není tedy efektivně využit. Nákup ze sítě 2000 W pro zbylé dvě fáze však zůstává. **Omezením přetoku v tomto případě dochází k ekonomickému využití elektřiny na pouhé 3 %.** Tento případ nastává u tzv. „nárokového



Obr. 4: Jednofázový FVS bez regulátoru

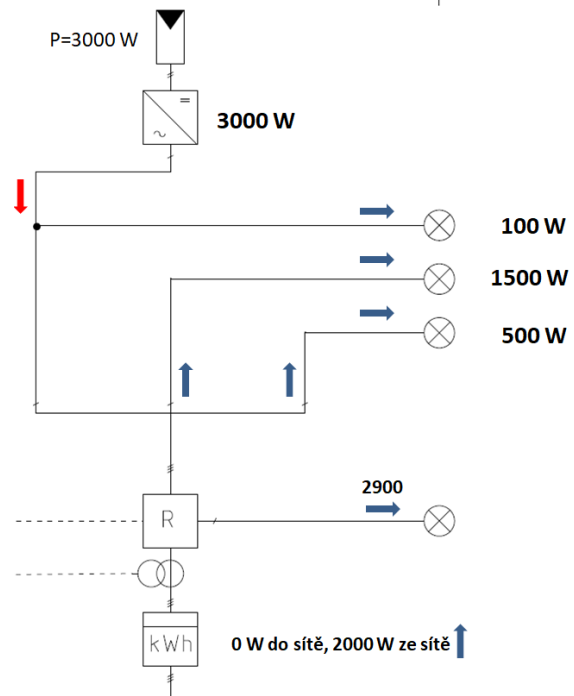
připojení“ jako mikrozdroje.

Jednofázový FV systém s regulátorem

Dalším posuzovaným zapojením je vylepšený jednofázový FVS s regulátorem podle obrázku 5.

Tento typ zapojení naleznete nejčastěji u starších typů střídačů, které nemají softwarovou či hardwarovou možnost regulace výkonu střídače. Za střídačem následuje jednofázový regulátor R, se zpětnou vazbou, který reguluje na tzv. virtuální nulu, podle čidla proudu před hlavním fakturačním elektroměrem.

U střídače dochází nejprve k přebytku výkonu 2900 W ($3000 - 100 = 2900$), avšak následně zapojený regulátor R využije tento přebytek do převážně tepelných spotřebičů (na teplo). Měnič je v tomto případě výkonově i ekonomicky plně využit, avšak je stále nutný nákup elektřiny ze sítě v rozsahu 2000 W ($1500 + 500$) do zbylých dvou fází.



Obr. 5: Jednofázový FVS s regulátorem

Zapojením také dochází k ekonomickému znehodnocení vyrobené elektřiny a to podle poměru ceny elektřiny a ceny tepla pro daný objekt. Pro cenu tepla ve výši 1/3 ceny elektřiny, pak vychází znehodnocení pro distribuční sazbu D02 o 65 %. **Ekonomické využití elektřiny je v tomto případě pouhých 35 %.**

Pro cenu tepla ve výši 1/3 ceny elektřiny, pak vychází znehodnocení pro distribuční sazbu D02 o 65 %. **Ekonomické využití elektřiny je v tomto případě pouhých 35 %.**

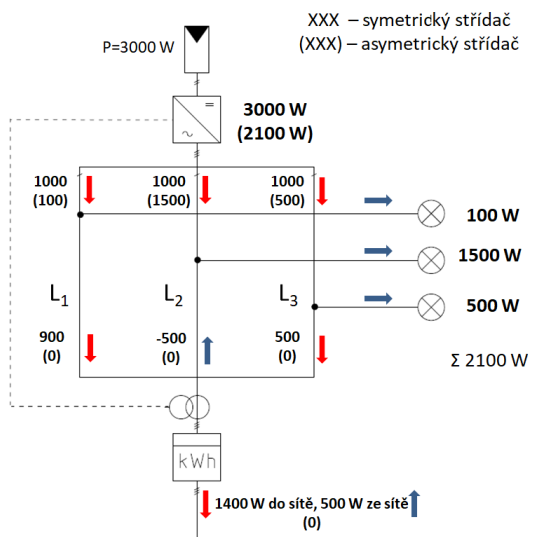
Třífázový FV systém bez regulátoru

Na obrázku 6 je znázorněný energetický tok třífázového FV systému bez regulátoru.

V případě využití symetrického střídače dochází k celkovému přebytku výkonu 1400 W ($900 + 500$) na L_1 ($1000 - 100 = 900$ W) a na L_3 ($1000 - 500 = 500$ W) a k nákupu elektřiny do fáze L_2 ($1000 - 1500 = -500$ W) 500 W. Střídač je výkonově využit a v tomto případě pracuje na 100 %. **Ovšem ekonomické využití elektřiny je pouze 37 %.**

Když použijeme asymetrický střídač, za pomoci zpětné vazby, která je vytvořena třemi měřicími transformátory proudu snímá aktuální velikost odebíraného proudu zátěží a reaguje tak na proměnlivou zátěž spotřebičů.

Výsledkem je virtuální nula na výstupu, avšak střídač v tomto případě není plně výkonově využit (výkon je omezen na 2100 W). **Ekonomické využití elektřiny se zvýšilo oproti symetrickému střídači o 33 %, na celkových 70 %.**



Obr. 6: Třífázový FVS bez regulátoru

Pro maximalizaci ekonomiky provozování je nutné povolit překážku využití „přetoků“ u asymetrického střídače a použití nadřazeného regulátoru.

Třífázový FV systém s regulátorem

Schéma asymetrický střídač s regulátorem a povolením „přetoků“ je možné spatřit na obrázku 7. Zapojení má dvě zpětné vazby. První zpětná vazba reguluje výkon střídače podle velikosti proudu před regulátorem a v případě povolení přetoků tedy nejprve vytvoří potřebný výkon k uspokojení zátěže a rozdíl ve výši 900 W rozdělí rovnoměrně 3 x 300 W, za předpokladu že není dosažena hodnota maximální výkonové nesouměrnosti střídače.

Schéma zapojení obsahuje třífázový regulátor R, který je řízen druhou zpětnou vazbou. Úkolem regulátoru je dosažení virtuální nuly na výstupu regulátoru směrem do distribuční soustavy. Výkon střídače je v tomto případě plně využit na 3000 W.

Ekonomika provozu bude závislá na způsobu využití přebytku elektřiny z regulátoru. Pro případ přeměny na teplo bude ekonomické využití elektřiny na 80 %. V případě využití přebytku elektřiny do elektrické akumulace, pak bude **ekonomické vyhodnocení elektřiny 100 %** (nepočítáme-li akumulační ztráty).

Závěr a doporučení

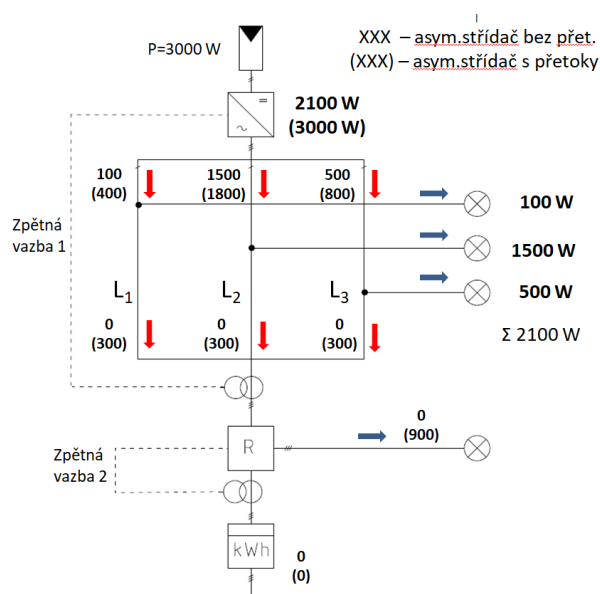
Analyzovány byly celkem čtyři druhy zapojení. Po dvou pro třífázový systém připojení, po dvou pro jednofázový systém připojení, v zapojení bez regulátoru, s regulátorem (pro využití přebytků). Všechny čtyři zapojení měly stejně zapojenou a výkonově shodnou spotřebu ve výši 2100 W. U každého zapojení byl použit měnič s výstupním výkonem na střídavé straně 3000 W.

Využíváním jednofázových řešení je podle výsledků analýz silně diskriminováno a nelze dosáhnout většího ekonomického využití, aniž bychom tomu přizpůsobili a přepojili třífázový rozvod spotřebičů do jedné fáze, případně zvětšíme jednofázové jištění, zapojíme jednofázový střídač s regulátorem přetoků. Vzhledem k uvedeným nevýhodám, které jednofázové řešení přináší, je nelze pro Českou republiku doporučit.

Z důvodu napojení českých domácností do distribuční NN sítě, které je z více než 99,8 % třífázové, lze doporučit před případným přepojováním domácího rozvodu do jedné fáze, použít třífázové střídače. Používání symetrického střídače v základním zapojení bez regulátoru přináší však jen 37 % ekonomické využití elektřiny a s tím spojenou nízkou návratnost. Z analýzy vyplynulo, že nejlepším řešením z hlediska návratnosti je třífázový systém a využití asymetrického střídače, na kterém lze povolit přetoky, s rozšířeným zapojením o třífázový regulátor přetoků nebo přímo elektrickou akumulaci (akumulátorové baterie). Tímto řešením maximalizujeme ekonomické využití elektřiny na 100 %.

Literatura

- [1] Metodický pokyn k upřesnění výpočtových postupů a okrajových podmínek pro podprogram NZÚ – Rodinné domy, podoblast podpory C3, Instalace solárních termických a fotovoltaických systémů. Nová zelená úsporám, SFŽP ČR, Praha, 2016.
- [2] MAULE P. a kolektiv: Aktualizace Státní energetické koncepce. Česká fotovoltaická asociace, Plzeň, 1. vydání, 2015, ISBN: 978-80-906281-0-6
- [3] HASELHUHN R., MAULE P.: Fotovoltaické systémy. Energetická příručka, Plzeň, 1. vydání, 2017, ISBN: 978-80-906281-5-1



Obr. 7: Třífázový FVS s regulátorem