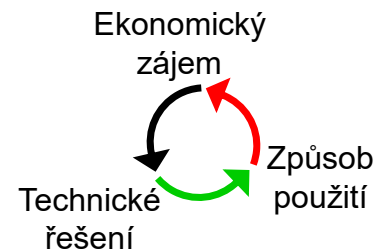


# Vliv různorodosti zdrojů na kvalitu elektřiny v průmyslových sítích



Centre for Research  
and Utilization  
of Renewable Energy

Jiří Drápela  
Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky

Výkonové vymezení zdrojů:

Malé zdroje nad 10 kW instalovaného výkonu výrobní jednotky, převážně kategorie A do 100 kW či kategorie B do 30 MW

Druh primárního zdroje energie a technologie konverze na elektrickou energii je jsou určeny řadou faktorů:

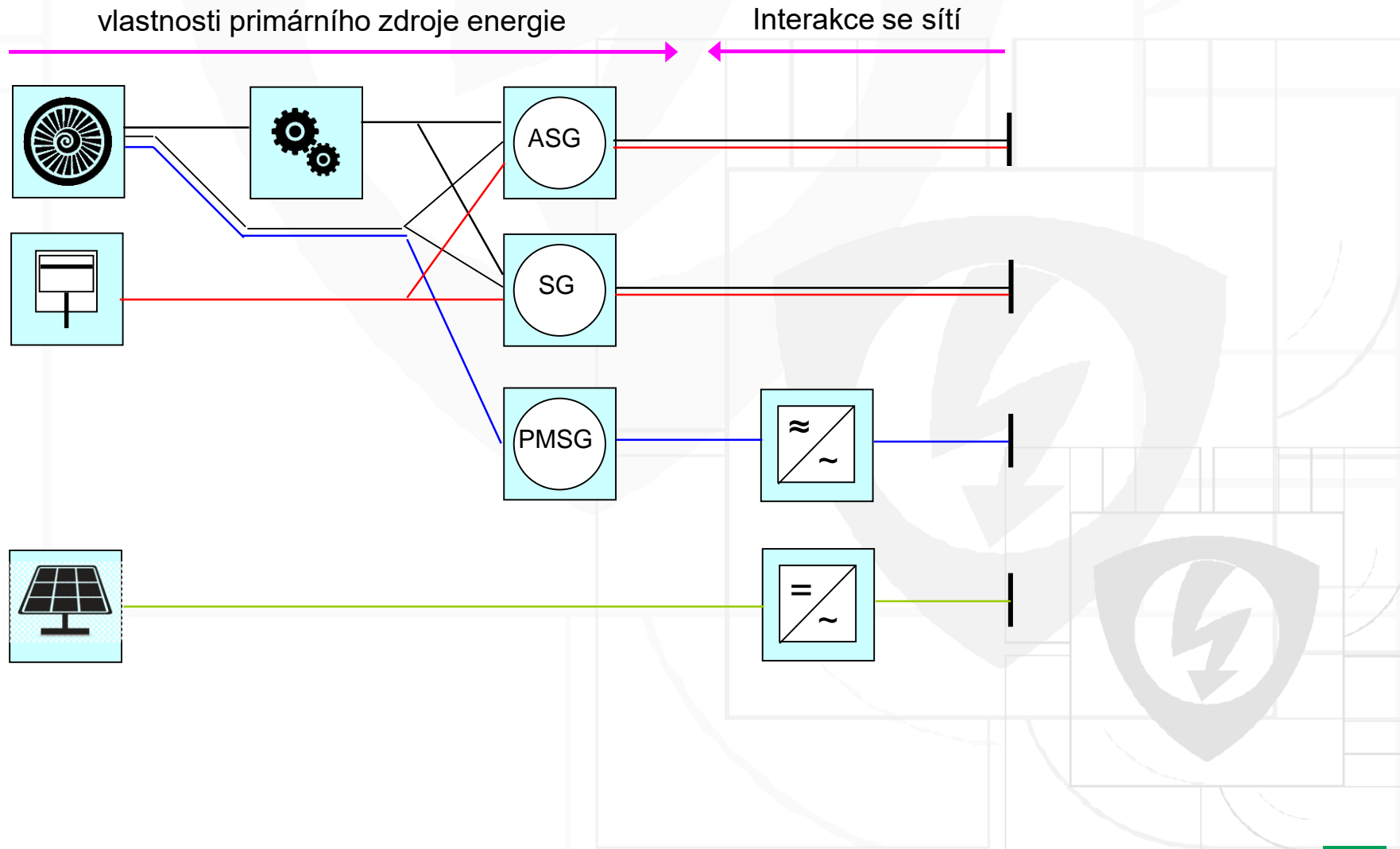
Dostupnost/preference primárních zdrojů, co-generace pro technologické procesy, životní cyklus dalších produktů, nákladovost technologie, celková ekonomická efektivnost, ....

Každý ze zdrojů elektřiny je charakteristický specifickými průvodními jevy, které ovlivňují kvalitu elektřiny a kvalitu napětí v síti, jak lokální (průmyslové), tak distribuční.

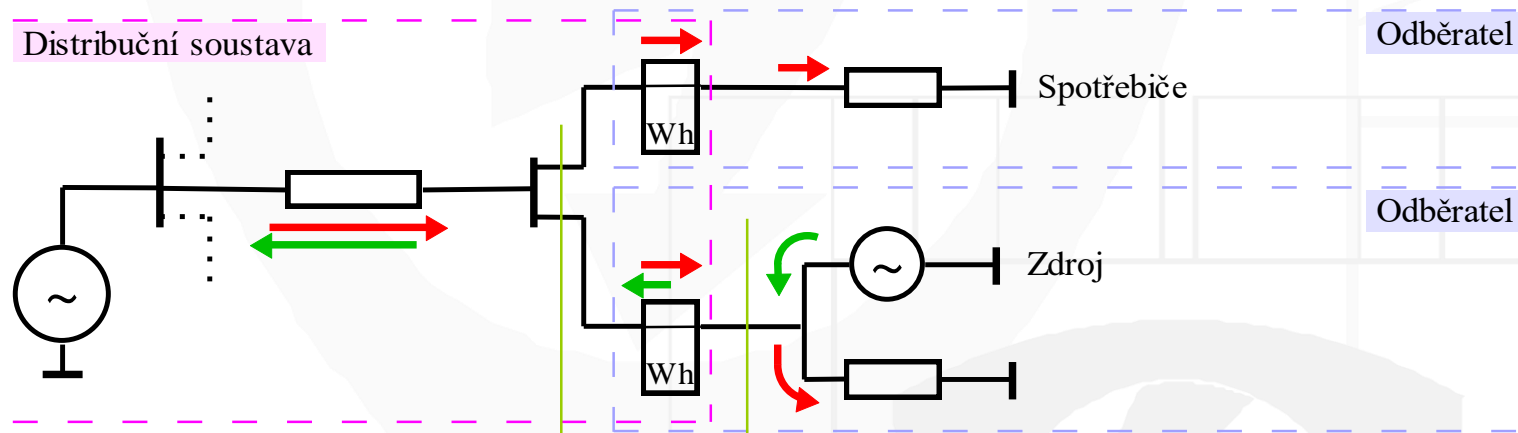
Obecně může být vliv zdroje na kvalitu elektřiny a napětí negativní i pozitivní

Některé jevy jsou důsledkem vlastností zdroje, jiné mají původ v interakci s elektrickou sítí

## Přehled charakteristických skupin zdrojů podle společných vlastností



## Situační schéma a vymezení souvislostí



### Potenciální zhoršení kvality napětí v

- Nesymetrii napětí
- Velikosti napětí/pomalé změny velikosti
- Kolísání napětí
- Zkreslení vlny napětí
- Vysoko-frekvenční (VF) rušení

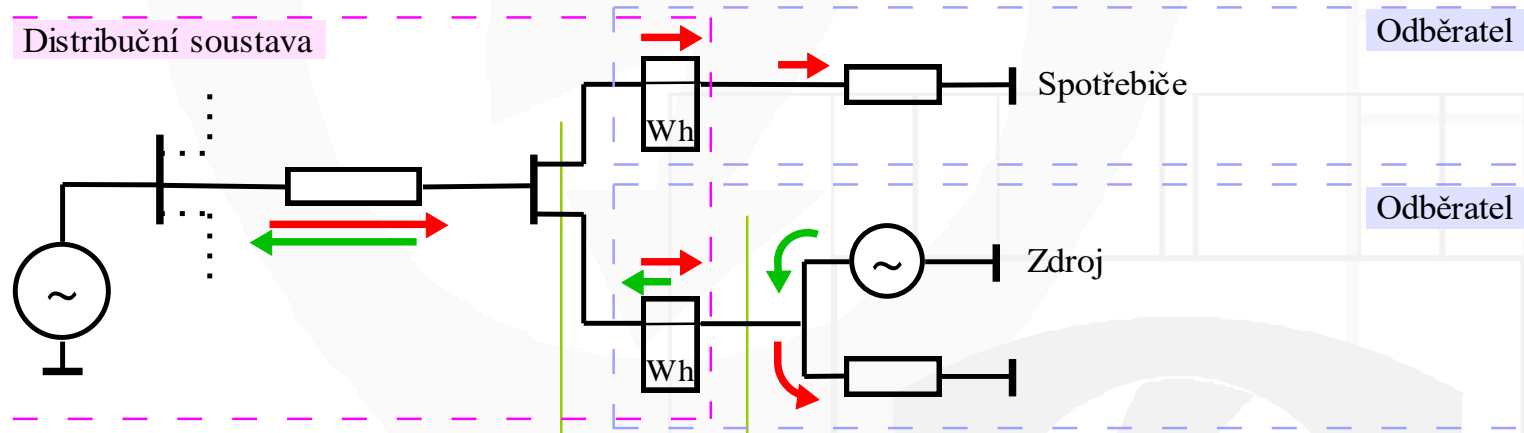
### Potenciálně související jevy

- Nesymetrie/symetrie zatížení (ve smyslu odběru i dodávky)
- Velikost zatížení (variace mezi odběrem a dodávkou)
- Rychlé změny zatížení (ve smyslu odběru i dodávky)
- Nelinearita systémů
- VF rušení

Míra zhoršení určena podmínkami připojení a úrovní rušení generovaného zdrojem rušení

Vznik a úroveň rušení jsou určeny konkrétním řešením (technologie – zařízení – topologie – řízení – připojení)

Související regulace pro dosažení očekávané a „správné“/řádné funkce systému (neúplný výčet)



Zákon č. 458/2000 Sb.  
Energetický zákon

Vyhláška č. 540/2005  
Sb. Vyhláška o kvalitě  
dodávek elektřiny a  
souvisejících služeb v  
elektroenergetice

Vyhláška č.  
16/2016 Sb.  
Vyhláška o  
podmínkách  
připojení k  
elektrizační  
soustavě

Pravidla provozování distribučních  
soustav

**EN 50160, EN 61000-4-Y**

Zákon č. 90/2016 Sb. Zákon o posuzování shody stanovených výrobků  
při jejich dodávání na trh

Zákon č. 22/1997 Sb. Zákon o technických požadavcích na  
výrobky a o změně a doplnění některých zákonů

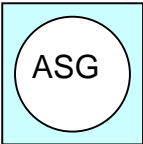
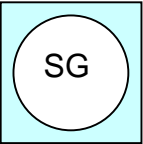

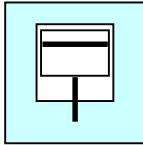
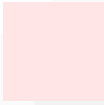


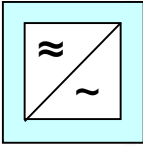
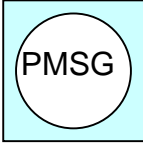


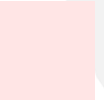
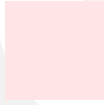

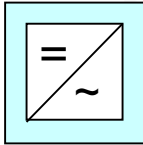
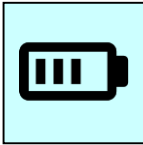
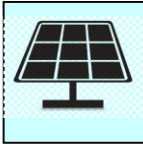






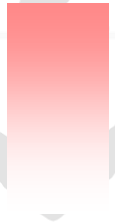
Nařízení vlády č. 117/2016 Sb. Nařízení vlády o posuzování  
shody výrobků z hlediska elektromagnetické kompatibility při  
jejich dodávání na trh

**Soubor harmonizovaných standardů (kmenové,  
základní a výrobkové  
EN 61000-6-Y, EN 61000-3-Y, EN 61000-4-Y**

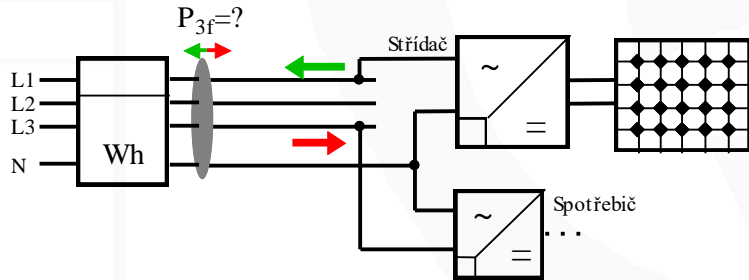
.....  
**ENpr 50549-1, ENpr 50549-2 ,ENpr 50549-10**

.....

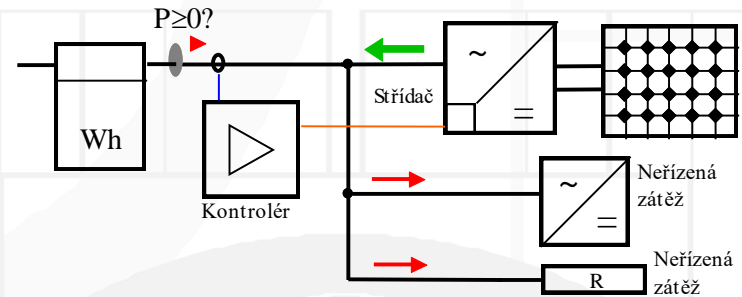
## Přehled charakteristických skupin zdrojů podle společných vlastností

	Supra-harmonické	Harmonické	Nesymetrie	Mezi-harmonické/ kolísání	Pomalé změny velikosti
   					
  					
  		 	 		

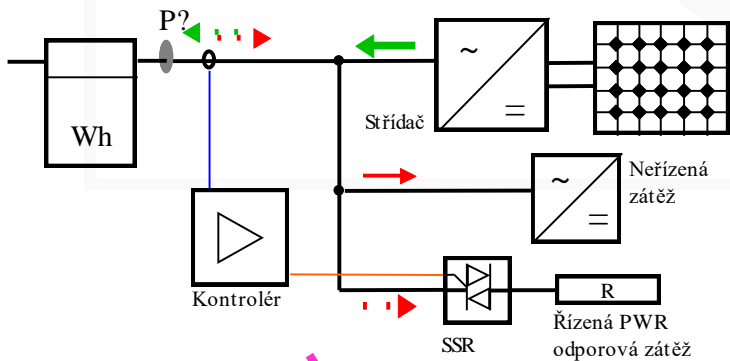
## A. Nekoordinovaná a nesymetrická výroba a spotřeba



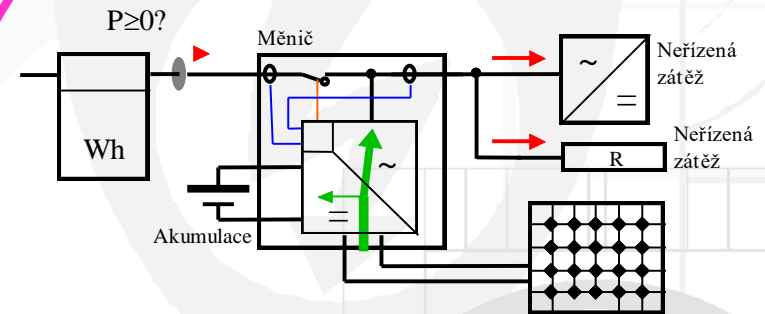
## E./F. „Eliminace“ dodávky regulací/omezením výkonu střídače, nebo hybridním měničem s baterií



## C. Zajištění bilance energie pomocí PWR regulace řízené AC spotřeby

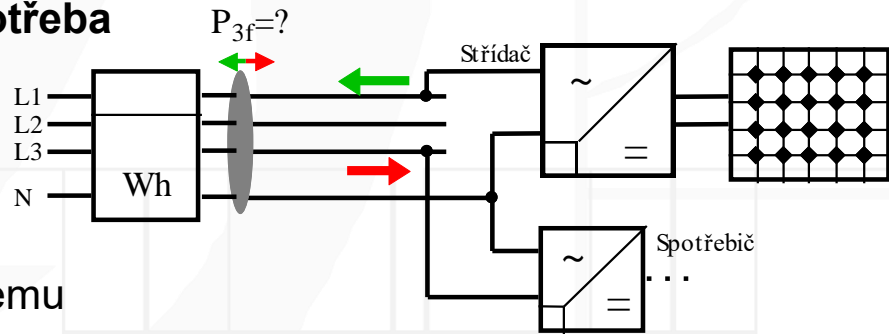


## D. Technologicky odpovídá E./F. Doplnkový systém pro eliminaci přetoků na bázi C.



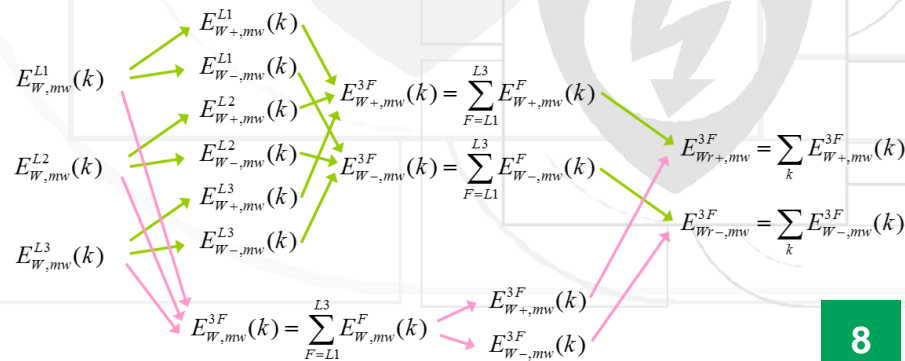
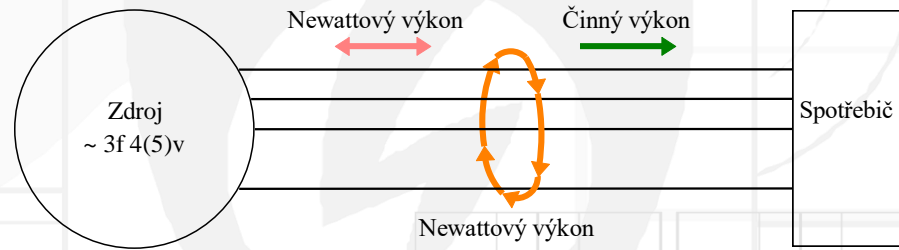
### Nekoordinovaná a nesymetrická výroba a spotřeba

- Výroba i spotřeba jsou spontánní, aktuální výroba určena osvitovými podmínkami a spotřeba technologickými a uživatelskými potřebami
- Zdroj a spotřebiče jsou připojeny do 3f systému nesymetricky
- Výroba a spotřeba může být soudobá, ale (nemusí být) není soumísná



### Měření skutečně prošlé energie

- Energie vyrobená v jedné fázi a spotřebovaná v druhé, i když ve stejný čas, musí být „směněna“ přes distribuční systém
- Mezi-fázová výměna energie způsobuje ztráty, přitom dřívější „součtové“ elektroměry zaznamenají při soudobém ději pouze saldo (rozdíl energií)
- Vyhláškou č. 82/2011 Sb. zavedena agregace činné energie do registrů elektroměrů po jednotlivých fázových energiích, měření po fázích probíhalo vždy
- Agregace vyrobené a spotřebované činné energie „po fázích“ motivuje k zodpovědné fázové koordinaci zdroje a zátěže

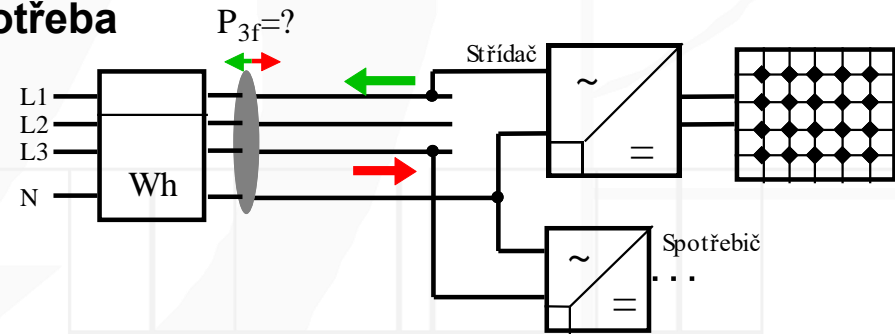




## Nekoordinovaná a nesymetrická výroba a spotřeba

### Rušivé jevy a vliv na kvalitu napětí

- Dodávka energie do sítě zvyšuje velikost napětí, což může neakceptovatelně narušit koncept koordinace velikosti napětí v DS
- Současná dodávka do jedné fáze a odběr z druhé fáze zvyšuje resp. snižuje napětí v těchto fázích a tím může dojít ke zvýšení nesymetrie 3f napěťové soustavy
- Zavedeny mezní výkony nesymetrických zdrojů (16 A/fázi),
- Vyhláškou č. 16/2016 Sb.se zavádí, že u mikrozdrojů v režimu tzv. „zjednodušeného připojení“ není dovolena dodávka do sítě a impedance připojení nesmí být větší než definovaná (0,47  $\Omega$  pro zdroje do 16 A; 0,75  $\Omega$  pro zdroje do 10 A)

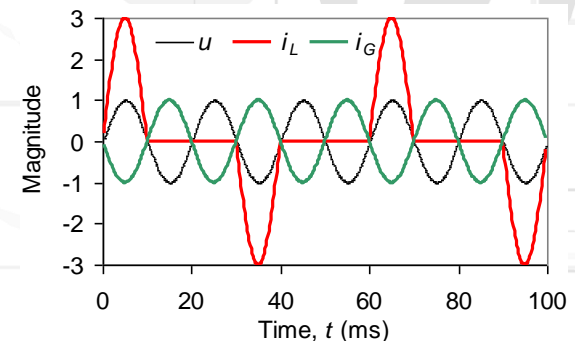
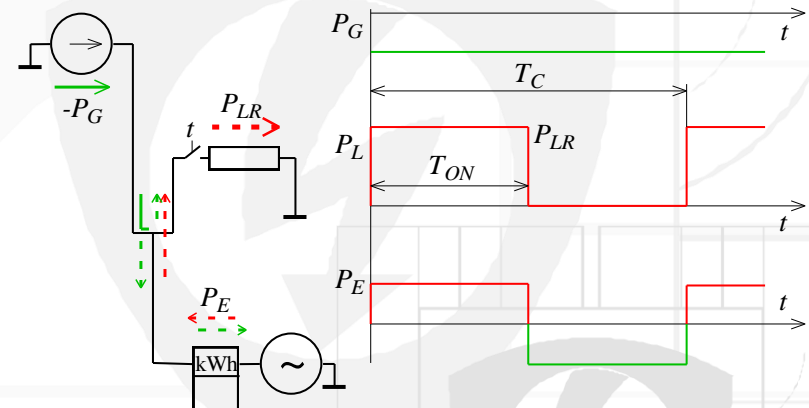
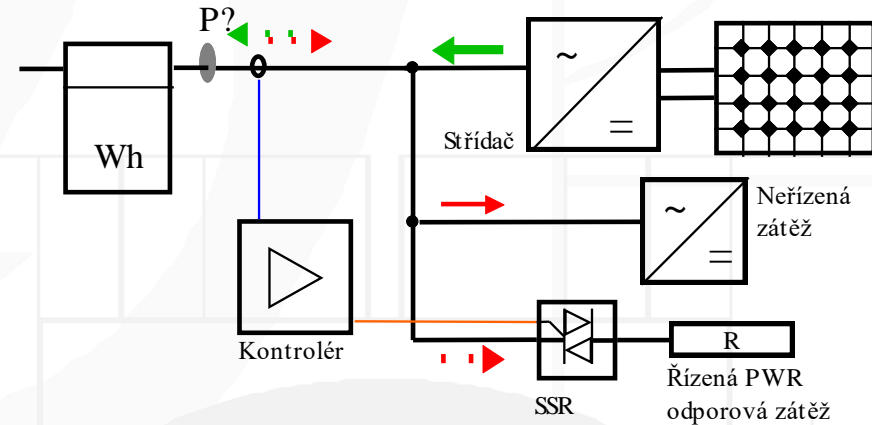


## C. Zajištění bilance energie pomocí PWR regulace řízené AC spotřeby

- Pro dosažení nulové energetické bilance v místě měření je použito rychlého řízeného spínání a vypínání většinou tepelných zátěží, vyznačujících se odložitelnou spotřebou a akumulacním potenciálem
- Pro rychlé spínání použity SSR (ZCS nebo s fázovou regulací)
- V podstatě se jedná o pulsně-šířkovou regulaci (PWR), která zajišťuje pouze zdánlivě plynulou regulaci a fiktivní vyváženost mezi výkonem zdroje a příkonem zátěží
- Energetická bilance pracuje a principu

$$E_{LR}|_{T_C} + E_G|_{T_C} = (P_{LR} \cdot T_{ON} + P_G \cdot T_C)|_{T_C} = 0$$

- A využívá „slabiny“ v metrice současných elektroměrů
- Základní spínací cykly jsou 100 Hz (fázový regulátor) a 33.3, 25, 20, ... Hz (SSR (ZCS))
- Část energie ze zdroje je transportována do spotřebičů přes distribuční soustavu, která je použita jako krátkodobý akumulátor



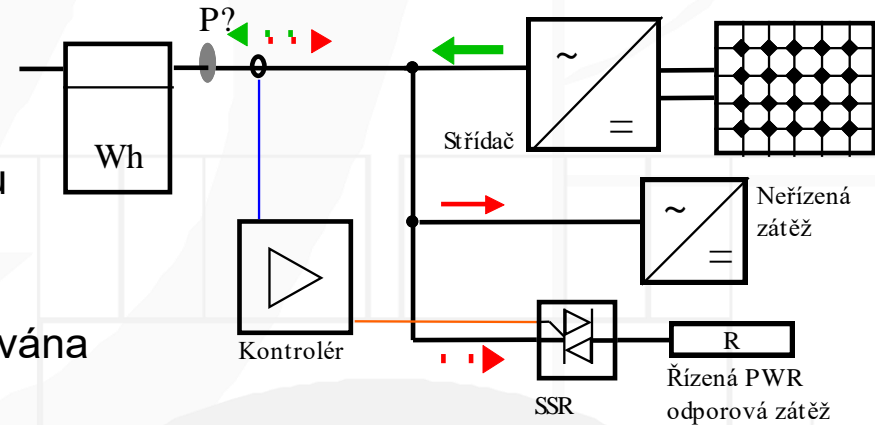
## C. Zajištění bilance energie pomocí PWR regulace řízené AC spotřeby

### Měření skutečně prošlé energie

- ❑ Elektroměr neregistruje s ohledem na metriku energii podle skutečných toků, zaznamená pouze případné saldo
- ❑ Ta část energie, která je krátkodobě akumulována v DS ale opět způsobuje ztráty

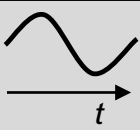
### Rušivé jevy a vliv na kvalitu napětí

- ❑ S řízením spotřeby pomocí PWR s rychlým spínání jsou spojeny tři zásadní rušivé jevy způsobující kolísání napětí, harmonické zkreslení napětí a supraharmonické rušení (do cca 30 kHz). První v případě použití spínačů SSR (ZCS) a druhé dva při použití fázových regulátorů
- ❑ PWR je standardním procesem používaným u řady spotřebičů, nicméně je výkonově a frekvenčně (četností spínání) omezena tak, aby splnili požadavky na EMC z hlediska emisí (EN 61000-3-3 – kolísání napětí, EN 61000-3-2 harmonické, EN 550XX – vf rušení)
- ❑ Problémem je, že jsou standardně v této aplikaci spínány výkony 1 – 3 kW, což vede v případě SSR na značné kolísání napětí a blikání světelných zdrojů a v případě fázových regulátorů a generování významných harmonických a rušení v pásmu do 30 kHz



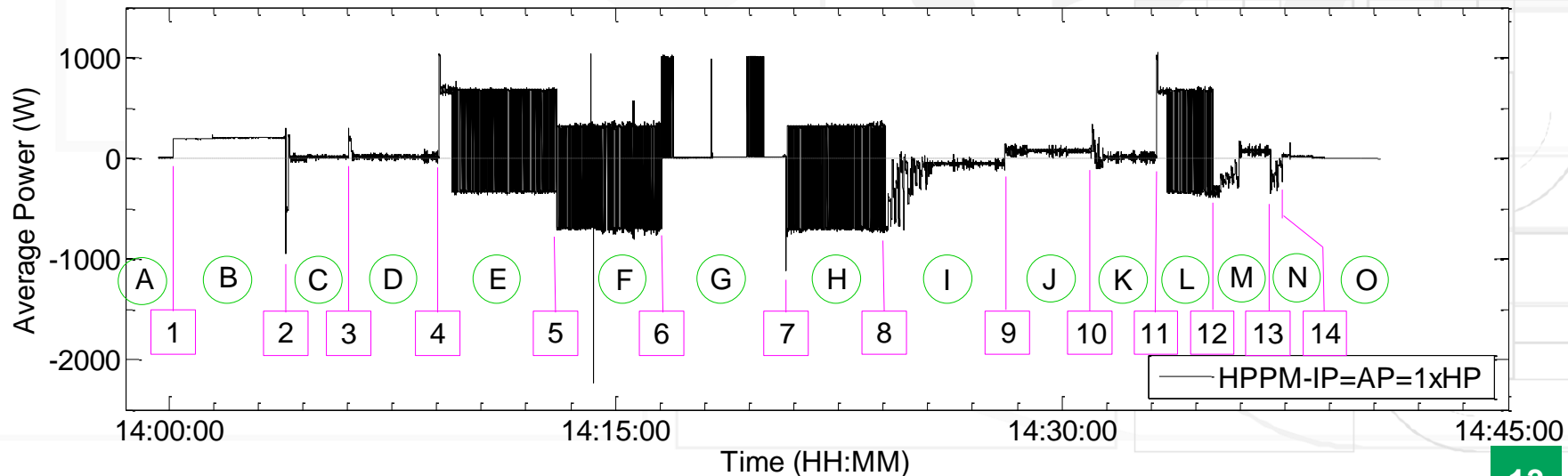
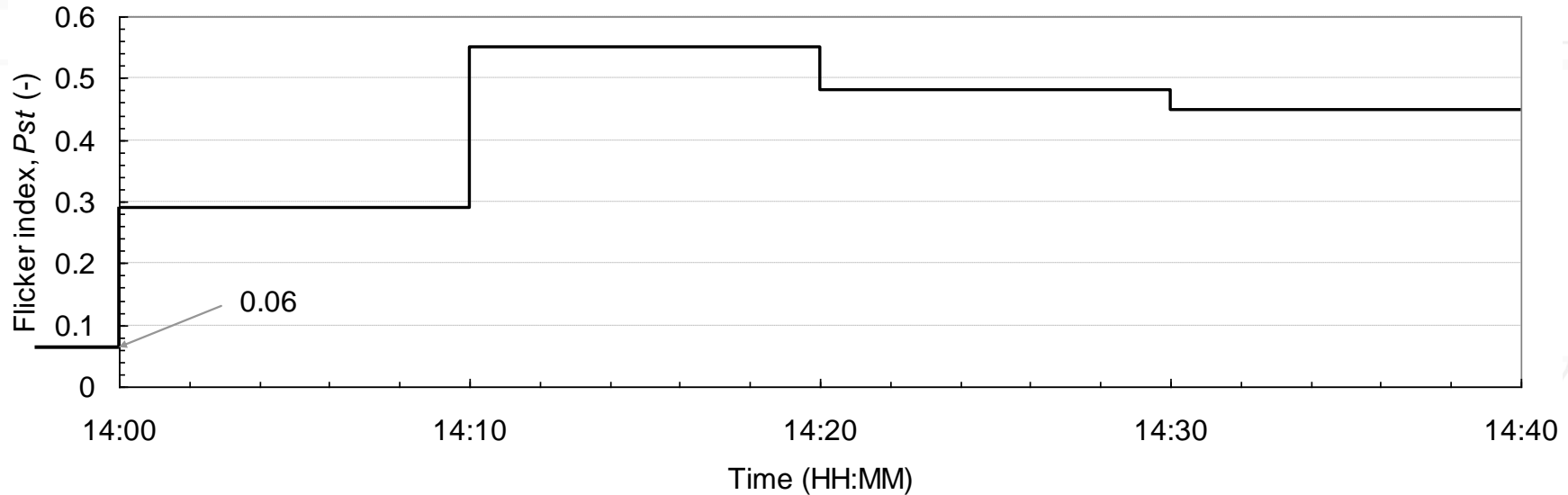
ON

Luminance-Temporal flicker, frekvence 2 Hz



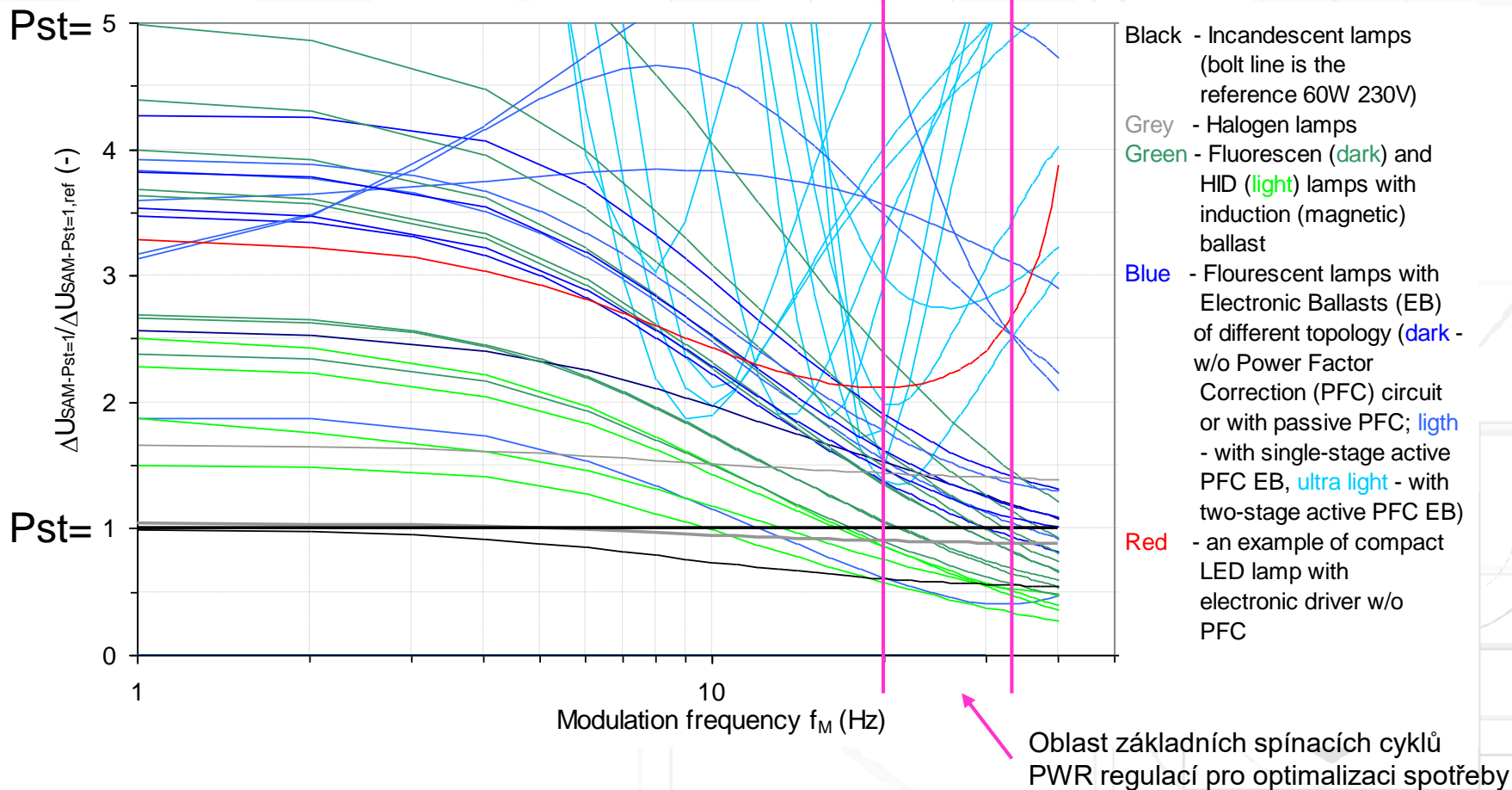
## Zajištění bilance energie pomocí PWR regulace řízené AC spotřeby

- Příklad funkce systému, míra vjemu blikání (impedance připojení nízká, cca  $0.25 \Omega$ )



## Zajištění bilance energie pomocí PWR regulace řízené AC spotřeby

- Porovnání odolnosti světelných zdrojů podle technologie vztažené k referenční žárovce 60 W, značí kolikrát je na dané frekvenci odolnější než klasická 60 W žárovka

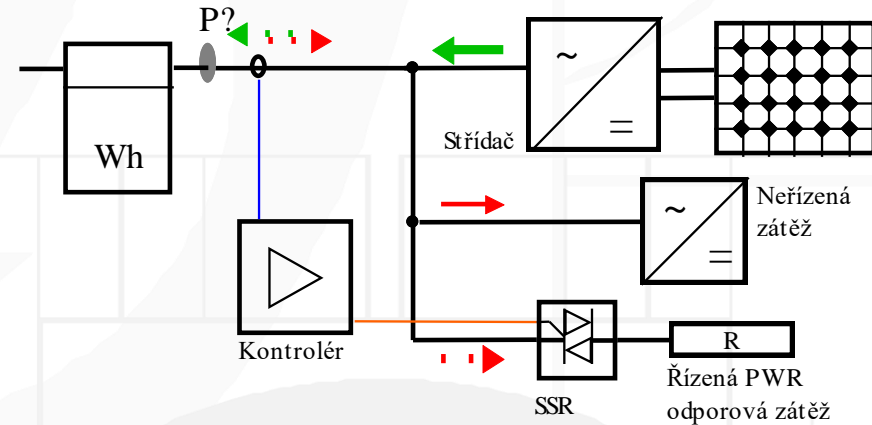


- V terénu reálně změřené úrovně flikru u těchto systémů dosahují hodnot do  $P_{st}=5$ , tzn. že téměř všechny světelné zdroje budou generovat rušivé blikání

## Zajištění bilance energie pomocí PWR regulace řízené AC spotřeby

### Rušivé jevy a vliv na kvalitu napětí

- Instalací takových systémů jsou narušeny regulační mechanismy pro zajištění EMC
- To že provozovatelé/ spotřebitelé mohou připojit na kontrolér v podstatě jakoukoliv charakterem vhodnou zátěž, což bývá zátěž s výkonem, který rozhodně překračuje dovolenou hodnotu, je do značné míry obcházení nastavených mechanismů pro regulaci výrobků z hlediska EMC
- Dle platných zákonů nese odpovědnost za vniklé škody ten, kdo zařízení, které nevyhovuje platným předpisům, nainstaloval. V kompetenci ČOI
- PWR je ale regulace velmi efektivní. Možné řešení je použít regulaci kaskádní s výkonem četností spínání stupňů tak, aby nebyly překročeny limity pro kolísání napětí či harmonické v místě připojení a aktivní regulační stupeň s maximálním nominálním příkonem cca 500 W v závislosti na podmínkách připojení (impedanci). Fázové regulátory je navíc nutné vybavit odpovídajícími vstupními filtry a umístit je co nejbližše připojené zátěži.

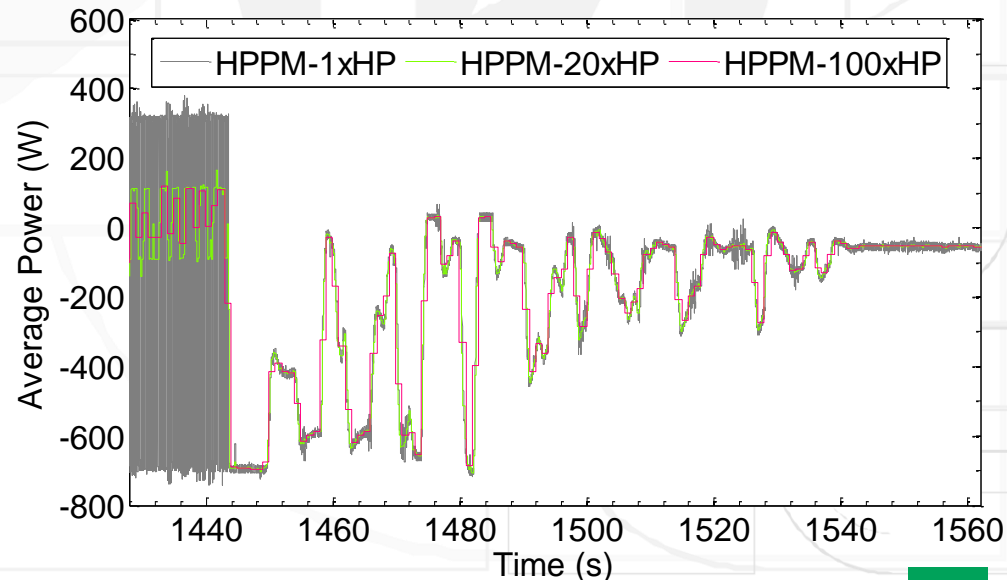
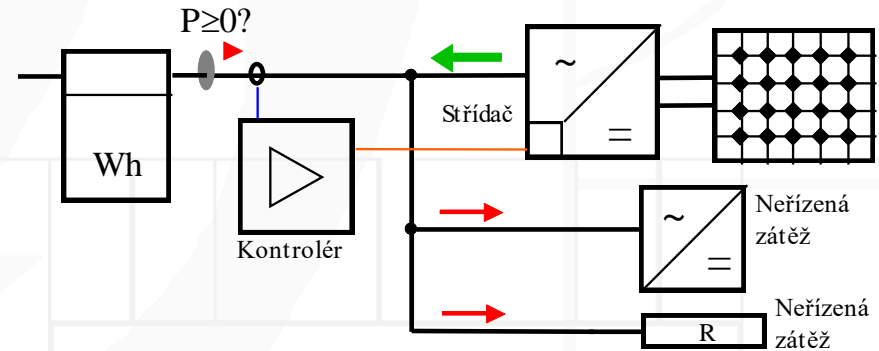


## „Eliminace“ dodávky regulací/omezením výkonu střídače

- Výkon střídače se s ohledem na dostupný nastavuje dle aktuální spotřeby, nebo se snižuje v případě, že je aktuální spotřeba nižší (je možné kombinovat s regulací spotřeby)
- V ustálených stavech může být statická odchylka regulace relativně malá a vzhledem k citlivosti regulátoru může být offset výroby posunut tak, aby se zamezilo dodávce do sítě
- Při přechodných dějích (odpojení/připojení zátěže) je však nutné uvažovat konečnou rychlost regulace, která může vést k dočasným až velmi krátkým dodávkám do sítě
- Odezva systému při změnách je velmi závislá na řešení regulační smyčky. Regulační zásah od 0.5 s až po několik minut!

## Měření skutečně prošlé energie

- Energie vyrobená a spotřebovaná bude změřena v zásadě správně s minimální odchylkou od skutečně prošlé

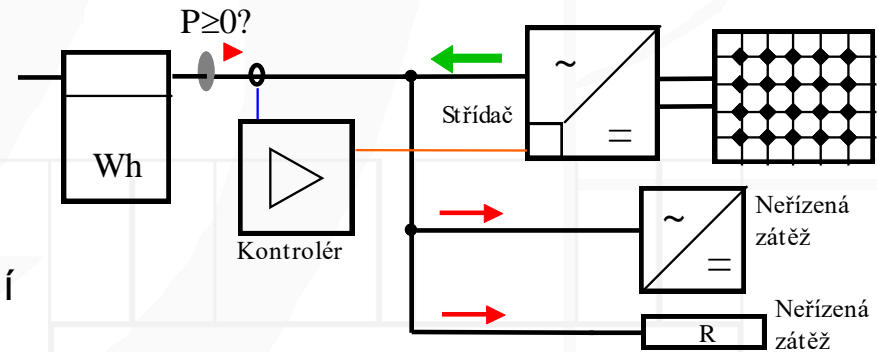




## „Eliminace“ dodávky regulací/omezením výkonu střídače

### Rušivé jevy a vliv na kvalitu napětí

- Jestliže má regulace výkonu zdroje konečnou odezvu, povede náhlá změna v zatížení ke zvýšení (odpojení) nebo snížení (připojení) napětí s velikostí danou velikostí změny zátěže a dobou trvání odpovídající době regulačního zásahu. Možnost zvýšení nebo snížení napětí zvyšuje možný rozsah variace napětí na dvojnásobek (oproti změně vyvolané pouze zátěží bez zdroje).
- Vzhledem k vyvolaným změnám lze také očekávat malý až velmi malý příspěvek k míře vjemu blikání ( $P_{st}$ ), nebude však významně vyšší než při samostatném připojování a odpojování zátěží.



## „Eliminace“ dodávky plynulou regulací spotřeby s AC vazbou

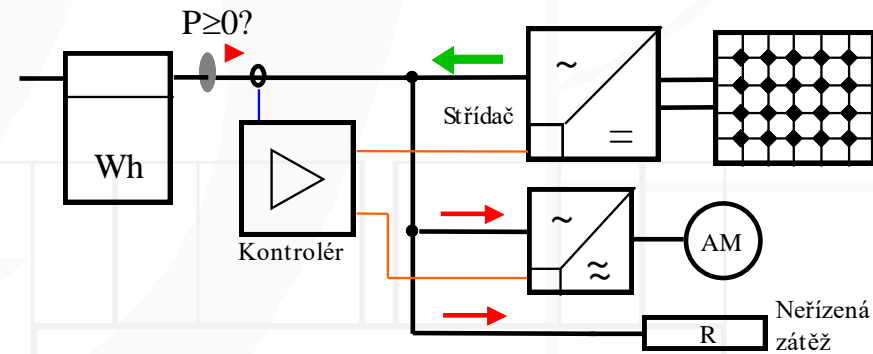
- Střídač pracuje s dostupným výkonem a bilanci zajišťuje plynule regulovatelná spotřeba
- Výroba zdroje je omezena jen v případě, že je dosažitelná spotřeba nižší
- „Vhodnou a dostupnou“ spotřebou s plynulou regulací je akumulace elektrické energie, kdy je akumulací potenciál využít pro maximalizaci využití dostupné energie zdroje
- Odezva regulace akumulace je opět konečná jako u řešení E.

### Měření skutečně prošlé energie

- Energie vyrobená a spotřebovaná bude změřena v zásadě správně s minimální odchylkou od skutečně prošlé

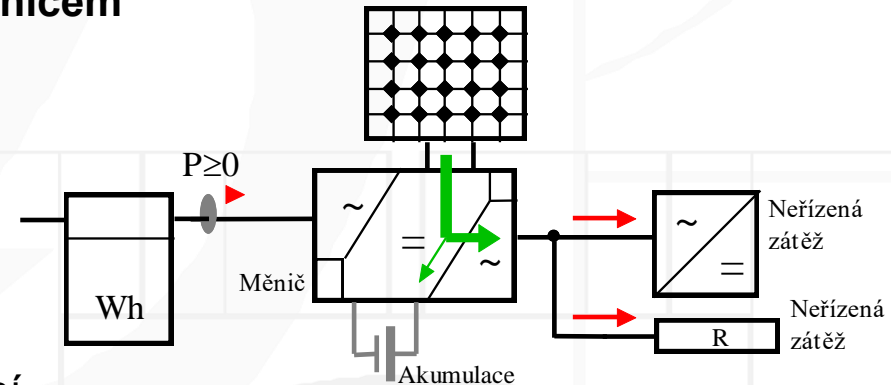
### Rušivé jevy a vliv na kvalitu napětí

- Obdobně jako u E.
- Řízení střídače na nulovou bilanci  $P$  na předávacím místě může vést z důvodu intermodulace k nestabilitě/oscilaci řízení s kolísáním napětí



## F. Řízení výkonů v systémech s „hybridním“ měničem

- Zajišťuje řízené oddělení „energetického bilančního uzlu“ od DS
- Umožňuje programově zamezit dodávkám do DS s velmi rychlou odezvou při změnách (vnitřní měření)
- Možnost programového nastavení pracovních režimů ovšem dovoluje nastavení stavů s přechodnou, či dlouhodobou dodávkou do sítě

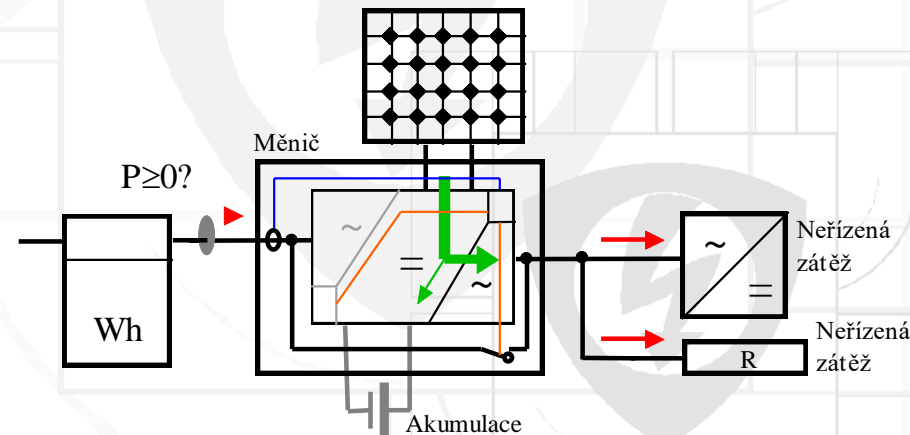


### Měření skutečně prošlé energie

- Energie vyrobená a spotřebovaná bude změřena správně

### Rušivé jevy a vliv na kvalitu napětí

- Je ze všech řešení nejmenší a v podstatě zanedbatelný
- Výjimku tvoří případy:
  - kdy je záměrně nastavena dodávka do DS, pak případ A.
  - kdy je měnič vybaven pracovním by-passem a ten je sepnut -> vstupní střídač odstaven a chování je srovnatelné s případem E.
  - případně reulace na nulový P může vést k oscilacím jako u E2.

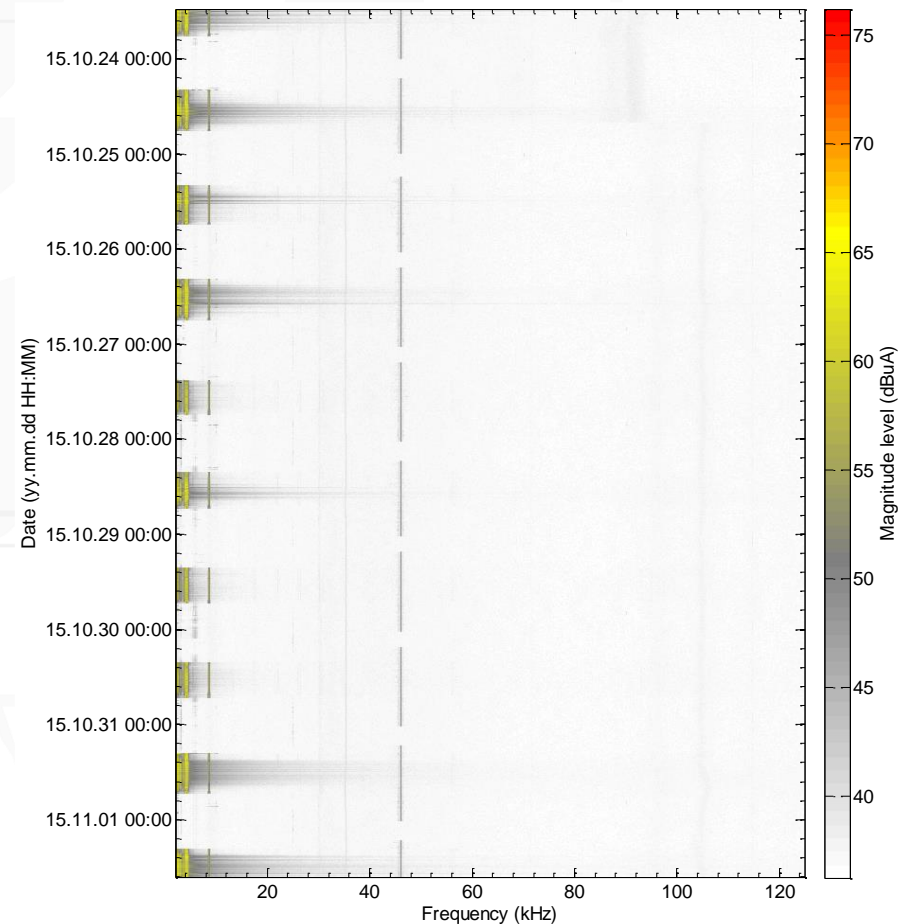


Všechny typy střídačů, stejně jako další polovodičové měniče uvedených systémů, jsou v důsledku spínacích procesů polovodičových spínačů zdrojem významného rušení v pásmu 2 – 150 kHz, které souvisí s jejich spínací frekvencí

Úroveň rušení střídačů závisí na konkrétním provedení (řešení silového obvodu, spínacích procesech, ...), ale také na provozních podmínkách (zatížení a impedančních charakteristika sítě v místě připojení)

Koordinace EMC v této (frekvenční) oblasti je velmi zpožděná a vzniklé vakuum může přinést a přináší řadu provozních problémů

Chybí nebo jsou nedostatečné standardy pro hodnocení emisí, či testování odolnosti, nebo nejsou řádně či správně definovány zkušební podmínky, atd



J. Moravek, P. Mastny, "Hybrid energy system - optimization and new concept", IAPGOS, vol. 1, no. 3, pp. 77-80, 2014, ISSN 2083-0157.

[https://www.researchgate.net/publication/287438345\\_HYBRID\\_ENERGY\\_SYSTEM\\_-\\_OPTIMIZATION\\_AND\\_NEW\\_CONCEPT](https://www.researchgate.net/publication/287438345_HYBRID_ENERGY_SYSTEM_-_OPTIMIZATION_AND_NEW_CONCEPT)

MORÁVEK, J.; DRÁPELA, J.; WASSERBAUER, V.; MASTNÝ, P. Power Quality Issues Related to Power Flow Control in Systems with Renewable Energy Micro Sources. In Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). 1. Praha: Czech Technical University in Prague, 2016. s. 283-288. ISBN: 978-1-5090-0907-7,

<http://ieeexplore.ieee.org/document/7521784/>

NOVOTNÝ, J.; DRÁPELA, J.; TOPOLÁNEK, D. Frequency response of revenue meters in measured active energy. In Proceedings of the 2016 IEEE 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). Belo Horizonte, Brazil: IEEE Power & Energy Society, 2016. s. 524-529. ISBN: 978-1-5090-3792-6.

<http://ieeexplore.ieee.org/document/7783309/>

J. Drápela. Měření činné energie statickými elektroměry při rychlých změnách mezi odběrem a dodávkou (prezentace). 2015, [https://www.cez.cz/edee/content/file/o-spolecnosti/dcerine-spolecnosti/cds/pro\\_zakazniky/konference2015/07b\\_vut\\_drapela\\_2\\_cz.pdf](https://www.cez.cz/edee/content/file/o-spolecnosti/dcerine-spolecnosti/cds/pro_zakazniky/konference2015/07b_vut_drapela_2_cz.pdf)

J. Drápela, et al. Immunity Issues Related to Revenue Meters. Panel Session: Harmonics from 2 kHz to 150 kHz: Immunity, Emission, Assessment and Compatibility (presentation). IEEE PES General Meeting 2015, July 26-30, Denver CO

J. Drápela. Harmonické, jejich původ, šíření, důsledky a omezení (video prezentace). L.P. Elektro č.58, 2013, <http://elektrika.cz/data/clanky/harmonicke>

**Děkuji za pozornost**

**Otázky?**

**Kontakt:**

Jiří Drápela  
Vysoké učení technické v Brně  
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky  
Technická 3082/12  
61600 Brno  
tel: +420 541146211  
email: [drapela@feec.vutbr.cz](mailto:drapela@feec.vutbr.cz), [drapela@ieee.org](mailto:drapela@ieee.org)