

Kompenzace elektrického jalového výkonu

z německého originálu časopisu *de*, 8/2008,
vydavatelství Hüthig & Pflaum Verlag GmbH München,
upravil Ing. Josef Košťál, redakce Elektro

Vhledem k neustále rostoucím cenám energií se dostává stále více do popředí zájmu také kompenzace jalového výkonu. Ochrana klimatu a energie patří k nejvíce diskutovaným otázkám současné politiky. Elektřina, která představuje formu energie s největší bonitou, je přitom ústředním tématem těchto diskusí. Při výrobě elektrické energie se v elektrárnách spalováním uhlí, ropy a plynu uvolňuje především obrovské množství oxidu uhličitého (CO_2), který negativně ovlivňuje klima. Počínaje výrobou elektrické energie z primárních zdrojů až po její spotřebu dochází v jednotlivých procesech ke ztrátám. Přestože z těchto celkových ztrát tvoří zjevně jen malou část proudové závislé ztráty elektřiny v přenosových a rozvodných sítích provozovatelů a v rozvodných sítích odběratelů, je konečná absolutní hodnota těchto ztrát řádově v miliardách kilowatthodin obrovská. Část proudově závislých ztrát v sítích vzniká indukčním jalovým výkonem vznikajícím z provozu běžných spotřebičů. Těmto ztrátám lze zabránit kompenzací.

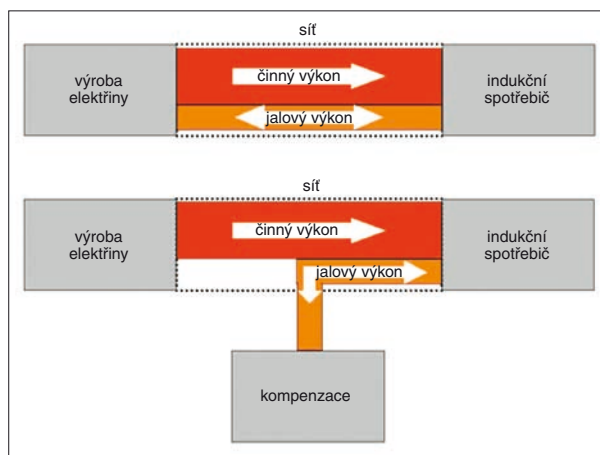
Vznik jalového výkonu

Elektrické spotřebiče odebírají ze sítě výkon, který je obecně součinem proudu a napětí. Tento odebraný výkon je dále ve spotřebiči přeměněn na užitečný výkon, který je označován jako činný výkon P . Elektrické spotřebiče pracující na indukčním principu, jsou-li připojeny na střídavý, resp. třífázový proud, odebírají ze sítě navíc výkon, který potřebují k vytvoření magnetického pole, jenž je poté vrácen zpět do sítě. Tento „neužitečný“ – jalový výkon Q tak pendluje mezi zdrojem (generátorem) a spotřebičem sem a tam (obr. 1) a dodatečně k činnému výkonu P zatěžuje generátory, transformátory, přenosová vedení vn a vvn i všechny elektrické rozvodné soustavy v sítích nn. Vektorový součet činného a jalového výkonu se nazývá zdánlivý výkon a označuje velkým písmenem S .

Mezi vektorem napětí a proudu leží úhel fázového posuvu φ . **Jalový výkon** se vypočítá jako součin napětí, proudu a sinu úhlu fázového posuvu ($Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$), **činný výkon** jako součin napětí, proudu a cosinu úhlu fázového posuvu ($P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$). Hodnota $\cos \varphi$ je označována jako **účinnost**. Zvětšuje-li se úhel fázového posuvu φ , zvětšuje se také jalový výkon.

Spotřebiče v energických rozvodných sítích mají zpravidla indukční charakter. Snížení indukčního jalového výkonu lze dosáhnout paralelním připojením kondenzátorů k indukčnímu spotřebiči. Díky tomu je vracející se jalový výkon, který byl použit k vytvoření

magnetického pole, „uskladněn“ v kondenzátoru a pendluje již jen mezi kondenzátorem a indukčním spotřebičem. Výkon kondenzátoru má kapacitní charakter a je směřován proti indukčnímu výkonu spotřebiče. Účinnost se při požadované, ale neúplné kompenzaci indukčního jalového výkonu změní z $\cos \varphi$ na $\cos \varphi'$ (obr. 2).



Obr. 1. Sít bez kompenzace (horní část) a s kompenzací (dolní část) jalového výkonu

Přínos kompenzace jalového výkonu k ochraně klimatu

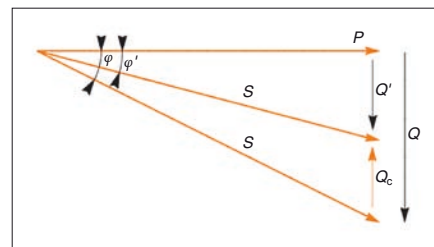
Podíl jalového výkonu v síti je vyjádřen účinností. Jalový výkon spotřebiče vede k tomu, že přívodní proud je větší, než by bylo třeba při přenosu čistě činného výkonu. Z tohoto důvodu se také zvyšují ztráty v přívodních vedeních nebo jinak řečeno: proudové zatížení elektrických sítí klesá proporcionálně s klesajícím zdánlivým výkonem. Ztráty v síti se však snižují s kvadrátem zatěžovacího proudu ($P_z = I^2 \cdot R$). Tak může např. 5% snížení proudu v důsledku kompenzace jalového výkonu přinést snížení ztrát v síti téměř

o 10 %. Na obr. 3 jsou zobrazeny zatěžovací proud a ztráty v síti jako funkce účinníku.

Ztráty způsobené jalovým výkonem se obecně týkají jednak přenosových a rozvodných sítí provozovatelů těchto sítí, ale také sítí se zařízeními odběratelů. Vlastní výpočty vycházející z výpočtového modelu Ústředního svazu elektrotechnického průmyslu ZVEI (*Zentralverband der deutschen elektrotechnischen Industrie*) [1] a čistá spotřeba elektrické energie v roce 2007 v Německu [2] ukazují, že proudově závislé ztráty způsobené jalovým výkonem by dosahovaly bez kompenzace jalového výkonu 5,5 mld. kW·h. Vezme-li se v úvahu současná úroveň kompenzace jalového výkonu, stále ještě zbývá pro kompenzaci potenciál min. 3,5 mld. kW·h, což by odpovídalo snížení emisí CO_2 o asi 1,8 mil. tun za rok. Navíc by tato uspořádaná elektrická energie vystačila na zásobování 1,1 mil. domácností po celý rok.

Kompenzace jalového výkonu je hospodárná

Dodavatelé elektřiny zpravidla účtují odběratelům z průmyslové oblasti na základě zvláštní smlouvy stanovenou cenu za jalovou energii, překročí-li jalová energie 50 % činné energie. Vzhledem k účinnosti to znamená, že nemá-li být účtována žádná jalová energie, musí být dodržena střední hodnota účinníku $\cos \varphi = 0,9$. Ve většině případů lze vycházet z toho, že by se pro smluvní odběratele platící za jalovou energii amortizovalo kompenzační zařízení jalového výkonu během jednoho až tří roků. Po uplynutí této doby by tedy kompenzační zařízení začalo „vydělávat“. Z toho-



Obr. 2. Vektorový diagram činného výkonu P , jalového výkonu Q a zdánlivého výkonu S

to důvodu se více vyplácí zvolit kompenzační zařízení s delší životností kondenzátorů, která se může u jednotlivých výrobců lišit.

Další důležitý parametr pro hospodárnost kompenzačního zařízení je úspora ztrát proudově závislých ztrát v rozvodné síti vlastně-

né odběratelem. Toto se týká především odběratelů se zvláštní smlouvou, kteří mají větší potřebu energie a disponují vlastní transformátorovou s měřením elektrické energie na straně vn. Snížení proudu kompenzací jalového výkonu může snížit proudové závislé ztráty, a tím i platby za energii. Pro konstrukční velikosti transformátoru nad 630 kV·A jmenovitého zdánlivého výkonu a s typickým využitím nad 70 % lze kompenzací ušetřit několik stovek až tisíc eur za rok.

Příklad hospodárnosti kompenzačního zařízení

V srpnu 2007 spotřebovalo virtuální nákupní středisko 113 700 kW·h činné a 99 010 kvar·h jalové energie v pásmu vysokého tarifu (VT). Z toho vychází střední hodnota účinnosti $\cos \varphi = 0,75$ ($\text{tg } \varphi = 99\,010/113\,700 = 0,87 \Rightarrow \cos \varphi = 0,75$).

Dodavatel energie účtuje nákupnímu středisku takové množství jalové energie, které překročí polovinu činné energie, tj. v daném případě 42 140 kvar·h. Cena za jednu kilo-

transformátory, u nichž má být kompenzován jalový výkon naprázdno. Neregulovaná kompenzační zařízení se instalují v blízkosti spotřebiče, se kterým jsou současně provozována (obr. 4).

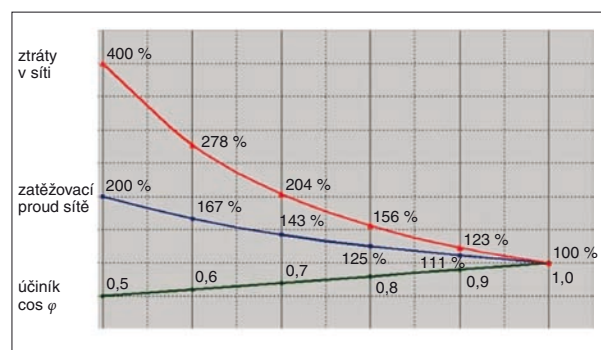
Regulovaná kompenzační zařízení jsou instalována centrálně v hlavním rozvodu. Protože je na hlavní rozvod připojeno velké množství spotřebičů a potřeba jalového výkonu kolísá, je jmenovitý výkon kompenzačního zařízení rozdělen stupňovitě. Regulátor jalového výkonu s měřením v napájení hlavního rozvodu reguluje výkon kompenzačního zařízení na hodnotu tzv. **cílového účinníku** připojováním nebo odpojováním jednotlivých stupňů kompenzačního zařízení (obr. 5).

Zjišťování potřeby indukčního jalového výkonu

Metoda měsíčního vyúčtování

Nejčastěji používaný způsob zjišťování potřeby indukčního jalového výkonu je metoda měsíčního vyúčtování, které vystavuje dodavatel energie. Toto vyúčtování dodavatele (energetického podniku) sestává většinou ze zúčtování poskytovaného výkonu (služby) a ze zúčtování činného a jalového výkonu.

Pomocí hodnot činné a jalové práce v pásmu vysokého tarifu lze stanovit průměrný účinník. Ze zúčtovacích hodnot výkonů a stanoveného cílového účinníku (min. $\cos \varphi' = 0,92$ – doporučuje se však $\cos \varphi' = 0,95$) vyjde pak jmenovitý výkon kompenzačního zařízení.



Obr. 3. Proudové zatížení (modře) a ztráty v síti (červeně) jako funkce účinníku (zeleně)

varhodinu zaplatí odběratel 1,30 centů, což odpovídá celkové částce 547 eur. Za celý rok 2007 zaplatilo nákupní středisko dodavateli elektřiny za jalovou energii 8 049 eur. Z tohoto důvodu se nákupní středisko rozhodlo tuto situaci řešit investicí do kompenzace a pověřilo elektrořemeslný podnik dodávkou a instalací tlumivého kompenzačního zařízení o výkonu 300 kvar. Celkové investiční náklady činily 7 990 eur. Tato investice by se měla zaplatit za sedmáct měsíců a až do konce životnosti kompenzačního zařízení ušetřit nákupnímu středisku ročně po odečtení nákladů na údržbu 5 500 eur.

Druhy kompenzace

V zásadě lze rozlišovat mezi pevným (neregulovaným) kompenzačním zařízením a regulovaným (řízeným) kompenzačním zařízením.

Pevná kompenzační zařízení mají pevně daný jmenovitý výkon a jsou vhodná pro přímou dílčí kompenzací spotřebičů, jako jsou např. motory v trvalém provozu nebo



Obr. 4. Pevné kompenzační zařízení bez výkonového vypínače napájení a s výkonovým vypínačem napájení

Příklad

Podle měsíčního vyúčtování má odběratel spotřebu činné energie 14 000 kW·h a spotřebu jalové energie 12 300 kvar·h v pásmu vysokého tarifu, a zaplatí proto za část spotřeby jalové energie dodavateli elektřiny. Odběrateli je dále fakturován činný výkon $P = 110$ kW. Z uvedených hodnot spotřeby energie lze vypočítat střední účinník $\cos \varphi = 0,75$ ($\text{tg } \varphi =$

$= 12\,300/14\,000 = 0,88 \Rightarrow \cos \varphi = 0,75$). Cílový účinník je stanoven na $\cos \varphi' = 0,95$, což odpovídá $\text{tg } \varphi' = 0,33$.

Z těchto hodnot se vypočítá minimální potřebný výkon kompenzačního zařízení $Q_k = P \cdot (\text{tg } \varphi - \text{tg } \varphi') = 110 (0,88 - 0,33) = 60,5$ kvar.

Pro účtovanou výkonovou špičku 110 kW je tedy v tomto případě třeba kompenzační zařízení o výkonu alespoň 60,5 kvar.

Metoda měření indukčního jalového výkonu

Jednou z dalších možností je měření potřeby indukčního jalového výkonu vestavěnými digitálními univerzálními měřicími přístroji. Spolehlivých a jistých výsledků lze docílit již použitím i jednoho takovéhoho přístroje,



Obr. 5. Regulovatelná kompenzační zařízení



Obr. 6. Univerzální měřicí přístroj PM200

jakým může být např. PM200 nebo PM700 [3] (obr. 6), který je instalován v napájení rozvodu. Takovéto univerzální měřicí přístroje umožňují jednoduché odečty naměřených maximálních hodnot činného, jalového a zdánlivého výkonu přes nastavitelné časové okno (např. 15 min). Na základě změřených údajů lze pak vypočítat jmenovitý výkon kompenzačního zařízení.

Zohlednění harmonických zátěží v síti

Elektronické spotřebiče, jako např. měniče frekvence, zdroje nepřerušitelného napájení (UPS), zařízení pro obloukové svařování, svítidla s elektronickým předřadníkem apod., vytvářejí harmonické proudy a způsobují harmonická napětí na impedancích elektrických rozvodných sítí. Tyto harmonické složky jsou příčinou mnoha poruch na elektrických zařízeních. Navíc jsou kondenzátory na harmo-

nické složky citlivé. Příliš vysoké harmonické mohou obecně způsobit u kondenzátorů nadměrné zahřívání velkými proudy, což vede k jejich předčasnému stárnutí a v konečném důsledku i poruše a selhání funkce kompenzačního zařízení. Z tohoto důvodu by měl být výběr kompenzačního zařízení uskutečněn také s přihlédnutím k celkovému harmonickému zkreslení proudu (THDi) v dané síti.

Podkladem pro výběr kompenzačního zařízení v sítích s harmonickými složkami může být měření existujících poměrů v dané síti. V tomto případě je třeba měřit harmonické proudy při největším zatížení a bez kompenzačního zařízení v napájení rozvodu od transformátoru (s jmenovitým zdánlivým výkonem S_n). Zdánlivý výkon (S), naměřený v tomto časovém intervalu, se využije pro dále uvedené porovnávací výpočty, které charakterizují tři typy sítě z hlediska harmonických zátěží pro účely výběru vhodného kompenzačního zařízení.

1. $THD(i) \cdot S/S_n \leq 5\%$

Tato síť je jen minimálně zatížena harmonickými složkami proudu. Z tohoto důvodu je ve čtyřstavitových sítích možné použít v kompenzačním zařízení kondenzátory podle [4] a [5] se jmenovitým napětím 400/415 V.

2. $5\% \leq THD(i) \cdot S/S_n \leq 10\%$

Tato síť odpovídá mírně zatížené síti harmonickými složkami proudu. Z tohoto důvodu je ve čtyřstavitových sítích třeba použít v kompenzačním zařízení předimenzované kondenzátory se jmenovitým napětím 480 V.

3. $10\% \leq THD(i) \cdot S/S_n \leq 20\%$

Tuto síť je třeba považovat za silně zatíženou harmonickými složkami proudu. Proto musí být ve čtyřstavitových sítích použity v kompenzačním zařízení předimenzované kondenzátory se jmenovitým napětím 480 V v kombinaci s tlumivkami s obvodovým filtrem.

Kompenzační zařízení v sítích minimálně až mírně zatíženými harmonickými

Kapacita netlumeného kompenzačního zařízení vytváří spolu s indukčností sítě kmitavý obvod. Vlastní rezonanční frekvenci tohoto kmitavého obvodu lze snadno určit pomocí přibližného vzorce použitím hodnot zkratového výkonu S_k v místě připojení a jmenovitého výkonu kompenzačního zařízení Q_c :

$$f_r = 50 \cdot \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}}$$

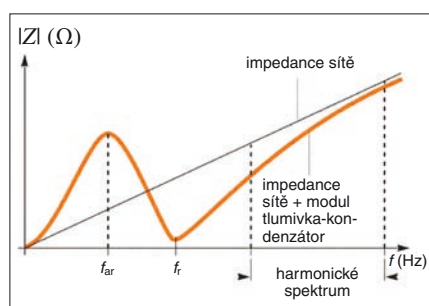
Jak vyplývá z uvedeného přibližného vzorce, klesá vlastní rezonanční frekvence kmitavého obvodu s rostoucím jmenovitým výkonem kompenzačního zařízení. Čím více stupňů regulovaného netlumeného kompenzačního zařízení se připojí, tím více klesne vlastní rezonanční frekvence. Přiblíží-li se hodnota vlastní rezonanční frekvence hodnotě harmonické frekvence vyskytující se v dané síti, zvýší se napětí této harmonické, což

může vést k přetěžování kondenzátorů se všemi důsledky, které z toho vyplývají.

Volba tlumení kompenzačního zařízení pro síť silně zatížená harmonickými

Aby bylo možné se vyhnout problémům s harmonickými v sítích silně zatížených harmonickými složkami proudu, je třeba zamezit výskytu rezonancí v oblastech kritických harmonických frekvencí.

U tlumených kompenzačních zařízení se kombinují kondenzátory s tlumivkami s obvodovým filtrem takovým způsobem, aby se sériová (vlastní) rezonanční frekvence f_r kondenzátoru a tlumivky s obvodovým filtrem nacházela dostatečně pod kritickou harmonickou frekvencí (obr. 7).



Obr. 7. Impedance v síti

Rovněž je důležité, aby se tato sériová rezonanční frekvence nacházela dostatečně pod hodnotou frekvence hromadného dálkového ovládání provozovatele napájecí sítě, čímž se zamezí jejímu rušení. Nejčastěji používané činitele ladění jsou $n = 3,8$ (190 Hz) a $n = 4,5$ (215 Hz). Pro významné zatěžování harmonickým proudem 3. řádu (150 Hz) se používá činitel ladění $n = 2,7$ (135 Hz).

Respektování frekvence hromadného dálkového ovládání

Kompenzační zařízení mohou rušit funkci frekvence hromadného dálkového ovládání. Při respektování několika jednoduchých pravidel se lze problémům spojených s touto frekvencí vyhnout.

Netlumená kompenzační zařízení

1. Je-li frekvence hromadného dálkového ovládání menší než 250 Hz, neměl by být jmenovitý výkon kompenzačního zařízení Q_c větší než 35 % výkonu transformátoru, resp. přívodu sítě.
2. Je-li frekvence hromadného dálkového ovládání menší než 250 Hz, měl by být jmenovitý výkon kompenzačního zařízení Q_c větší než 35 % výkonu transformátoru, resp. přívodu sítě, měl by být přizván ke konzultaci místní elektrorozvodný podnik. V tomto případě bude nezbytné zabudovat do kompenzačního zařízení zádrž tónové frekvence.

3. Je-li frekvence hromadného dálkového ovládání větší než 250 Hz, měl by být přizván ke konzultaci místní elektrorozvodný podnik. V tomto případě bude nezbytné zabudovat do kompenzačního zařízení zádrž tónové frekvence.

Tlumená kompenzační zařízení

1. Je-li frekvence hromadného dálkového ovládání v rozsahu 165 až 250 Hz, je třeba zvolit tlumení kompenzačního zařízení s činitelem ladění $n = 2,7$ (135 Hz).
2. Je-li frekvence hromadného dálkového ovládání v rozsahu 250 až 350 Hz a není-li kritická harmonická frekvence menší než 250 Hz (5. řád), je třeba zvolit tlumení kompenzačního zařízení s činitelem ladění $n = 3,8$ (190 Hz).
3. Je-li frekvence hromadného dálkového ovládání větší než 350 Hz a není-li kritická harmonická frekvence menší než 250 Hz (5. řád), je třeba zvolit tlumení kompenzačního zařízení s činitelem ladění $n = 4,3$ (215 Hz).

Nové možnosti pro obor elektro

Při bližším pohledu na současnou globální situaci v oblasti výroby, přenosu, rozvodu a spotřeby elektrické energie se lze domnívat, že započala nová energetická éra. Jejimi charakteristickými rysy jsou rostoucí ceny energií a sílící požadavky na ochranu klimatu. Energetická účinnost v elektrotechnice je tedy stěžejní otázkou nejbližší budoucnosti, přičemž kompenzace jalového výkonu může tvořit důležitou část jejího řešení a současně přispět také k ochraně klimatu.

Požadavky na stanovení účinnosti $\cos \varphi$ v rozsahu hodnot 0,95 (indukční charakter) až 1,00 pro odběr elektrického proudu v průmyslu, obchodu a řemeslné oblasti se budou v této souvislosti zvyšovat. Inovačnímu elektrořemeslníkovi, který pečuje po technické stránce o životnostný nebo průmyslový podnik, se tak v této oblasti naskýtají nové tržní příležitosti – je třeba je jen včas rozpoznat a využít.

Literatura:

- [1] BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, Spolkový svaz energetického a vodního hospodářství) – www.bdew.de
- [2] ZVEI (Zentralverband der deutschen elektrotechnischen Industrie, Ústřední svaz elektrotechnického průmyslu) – www.zvei.org
- [3] Schneider Electric GmbH – www.schneider-electric.de, katalog ZXX Powerlogic.
- [4] EN 60831-1 *Paralelní silové kondenzátory samoregeneračního typu pro střídavé výkonové systémy se jmenovitým napětím do 1 kV včetně – Část 1: Všeobecně – Provedení, zkoušení a dimenzování – Bezpečnostní požadavky – Pokyny pro montáž a provoz.*
- [5] EN 60831-2 *Paralelní silové kondenzátory samoregeneračního typu pro střídavé výkonové systémy se jmenovitým napětím do 1 kV včetně – Část 2: Zkouška trvanlivosti, zkouška samoregenerace a destrukční zkouška.*