

## Teorie kompenzace jalového induktivního výkonu

### I. Úvod

Prvky rozvodné soustavy (zdroje, vedení, transformátory, spotřebiče, spínací a jistící komponenty) jsou obecně vzato impedance a jejich náhradní schéma můžeme sestavit pomocí základních elementů - rezistor, indukčnost, kapacita (R, L, C, G). Jak je všeobecně známo, střídavá elektrická energie se nedá akumulovat a teče z místa jejího přebytku (zdroj) do místa jejího nedostatku (spotřebič). Na elementech spojovací cesty (vedení, pojistky, spínače, ...) potom v důsledku protékajícího proudu vznikají úbytky na napětí a ztráty "Joulovým" teplem. Veškeré komponenty této přenosové cesty musí být dimenzovány na celkový proud (zdánlivý – v komplexním tvaru), který se skládá z činné a jalové složky. Činná složka se ve spotřebiči mění na práci, kdežto jalová se pouze přelévá z místa přebytku do místa nedostatku (slouží především k vytváření elektromagnetických polí) a proto je jalová energie nazývána "fluktuální". Pro její výrobu není nutná vyšší potřeba primárního zdroje energie (například vyšší spotřeba páry v turbíně). O podílu jalové složky na celkovém zdánlivém výkonu vypovídá účinník ( $\cos \varphi$ ). V případě, že účinník je roven 1, přenáší se pouze činná složka, zdánlivý výkon je roven činnému a provoz energetického zařízení je nejvíce ekonomický (minimální úbytky napětí, ztráty výkonu – neoptimálnější využití přenosové soustavy). Z tohoto důvodu je stanoveny závazné hodnoty účinníku odebraného výkonu – tzv. neutrální hodnota v rozmezí 0,95 induktivního charakteru až 1,00.

Nejběžnější spotřebiče elektrické energie v průmyslových sítích mají induktivní charakter, v první řadě jsou to elektrické pohony. Plně zatížený motor pracuje s účinníkem 0,7 až 0,9 (záleží na jeho velikosti, typu a technologické úrovni zpracování), ale při běhu naprázdno může mít účinník roven až 0,3. S rostoucími požadavky na řízení pohonů dochází ke značnému nasazování regulovaných pohonů, napájených z řízených polovodičových usměrňovačů a statických měničů kmitočtu. Tyto jsou spolu s dalšími nelineárními spotřebiči (výbojkové a zářivkové osvětlení, elektronické předřadníky, svařovací agregáty – zejména bodové, záložní zdroje, počítače, různá elektronická zařízení pracující na principu přerušování napětíové křivky a podobně) zdrojem harmonických, které svým příspěvkem zvyšují zatížení prvků rozvodné soustavy. Harmonické proudy mají frekvenci rovnou celistvým násobkům základní frekvence (50 Hz), například 3. harmonická má frekvenci 150 Hz, 5. harmonická má frekvenci 250 Hz, atd..

Aby odběratel elektrické energie byl tzv. "bezproblémový", musí podle výše citovaného zákona odebírat elektrickou energii s účinníkem v mezích neutrální hodnoty 0,95 ind. až 1,00, to znamená, že jednak musí své zařízení kompenzovat, ale na druhé straně nesmí překompenzovávat. Dále nesmí provozem svého zařízení zpětně působit na kvalitu dodávané elektřiny – nesmí ovlivňovat funkci řídicí, měřicí a zabezpečovací techniky a činnost systému hromadného dálkového ovládání (HDO). "Kvalita" elektrické energie je definována v podnikových normách energetiky řady PNE 33 34 30-..., respektive ve standardu ČSN EN 50 160, kde jsou uvedeny i kompatibilní úrovně jednotlivých harmonických napětí a celkové zkreslení sinusovky napětí na jednotlivých napětíových hladinách. To znamená, že musí eliminovat harmonické, které vznikají v jeho odběrném zařízení.

### II. Teorie

Pro lepší pohled na řešení kompenzace a filtrace harmonických zde uvádíme analytický rozbor problému. Veškeré výpočty se provádějí v komplexním tvaru. Jedná se o vektory, které se skládají z reálné a imaginární části označené symbolem "j". Velikost zdánlivého proudu (vektoru) je dána geometrickým součtem všech složek jednotlivých harmonických

$$\vec{I} = \sum_{h=1}^n \vec{I}_h = \sum_{h=1}^n \text{Re}(\vec{I}_h) + j * \sum_{h=1}^n \text{Im}(\vec{I}_h)$$

a jeho absolutní hodnota se vypočítá podle vztahu

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^n I_h^2} \quad \text{kde } h = 2, 3, \dots, \text{ je řád harmonické}$$

Fázový posun je úhel mezi vektorem napětí a proudu (pro jednoduchost položíme reálnou osu do směru vektoru napětí). Skutečný fázový posun si definujeme jako úhel mezi zdánlivou a činnou složkou proudu a nazýváme jej faktorem výkonu (POWER FACTOR - PF). V případě sinusových průběhů bez přítomnosti vyšších harmonických je roven účinníku ( $\cos \varphi$ ). Flukтуаční výkon v tomto případě nazýváme jalový výkon a měří se v kvar. Induktivní jalový proud je fázově zpožděn o  $90^\circ$  oproti napětí.

V sítích s nelineárními spotřebiči se mimo proudu základní harmonické  $I_1$  (50 Hz) vyskytují harmonické proudy, jejichž frekvence je násobkem základního kmitočtu a budeme je nazývat  $I_2, I_3, I_4, \dots$  atd. (druhá, třetí, čtvrtá, ... harmonická). Naproti tomu se dá při prvním přiblížení předpokládat že napětí bude mít málo distorze (vzhledem k předpokládanému velkému zkratovému výkonu sítě - "tvrdý zdroj") a proto uvažujeme pouze jedině napětí základní harmonické o frekvenci 50 Hz:

$$\vec{U} = \vec{U}_1 = U_1$$

Zdánlivý výkon spotřebiče obdržíme součinem procházejícího proudu a napětí na jeho svorkách.

$$\vec{S} = \vec{U} * \vec{I} = U_1 * I_1 * \cos \varphi + j * U_1 * I_1 * \sin \varphi + U_1 * \sum_{h=2}^n \vec{I}_h = P + j * Q + \vec{D}$$

Z analýzy výše uvedeného vzorce vyplývá, že v sítích s obsahem vyšších harmonických se celkový zdánlivý výkon skládá ze třech složek:

#### - Činný výkon:

$$P = U_1 * I_1 * \cos \varphi \quad \text{- tento výraz nám určuje užitečný výkon}$$

#### - Jalový výkon:

$$Q = U_1 * I_1 * \sin \varphi \quad \text{- tento výraz odpovídá klasickému jalovému výkonu čistě sinusového průběhu a jak již bylo řečeno dříve, není spotřebováván a slouží k vytváření magnetických polí}$$

#### - Distorzní výkon:

$$\vec{D} = U_1 * \sum_{h=2}^n \vec{I}_h \quad \text{- tento výraz je výlučný pro distorzní systémy. Jedná se o flukтуаční výkon, který se objevuje jako důsledek harmonických proudů}$$

Ve skutečnosti i napětí obsahuje harmonické složky, které vytvoří prostor pro odpovídající výkon činný a jalový. V každém případě, činný výkon harmonických nevykonává užitečnou práci. Například u motoru, točivé pole k harmonickým frekvencím nevytváří využitelný pár, ačkoliv produkuje ztráty. Všeobecně, činné výkony harmonických se podílejí na vytváření ztrát, zahřívání vedení, vlastních spotřebičů a způsobují úbytky na vedeních.

V obvodech s vyššími harmonickými budeme nadále nazývat vztah mezi činným výkonem  $P_c$  a celkovým zdánlivým výkonem  $S$  jako faktor výkonu  $PF$ . V těchto případech je zřejmé, že  $PF$  již nesouhlasí s kosinem úhlu  $\varphi$ , který tvoří základní složky napětí a proudu ( $\cos \varphi \neq PF$ ).

Důležitým závěrem tohoto je, že při stejném činném výkonu je celkový zdánlivý výkon výrazně vyšší v případě výskytu vyšších harmonických. Praktický důsledek tohoto jevu je, že při přenosu stejného

činného výkonu v elektrickém obvodu s harmonickými teče větší zdánlivý proud a z těchto důvodů musíme dimenzovat komponenty přenosové soustavy na tento vyšší zdánlivý výkon. Z důvodu vyšší hodnoty zdánlivého proudu jsou zvýšené ztráty Joulovým teplem (ztráty v mědi) úměrné čtverci zdánlivého proudu:

$$P_J = Z * I^2$$

a zvýší se i úbytek napětí, který je přímo úměrný jeho velikostí:

$$\Delta U = Z * I$$

Nejzávažnějším problémem jsou ale ztráty na transformátorech a ostatních spotřebičích s magnetickým obvodem:

**ztráty v železe ( $P_{Fe}$ )** se skládají ze: ( $B = m * H \approx I$ )

**ztrát hysterezních** v důsledku přemagnetizace  $P_H \approx f * B_{max}^2 \approx f * I_{max}^2$

a **ztrát vířivými proudy**  $P_V \approx f^2 * B_{max}^2 \approx f^2 * I_{max}^2$

**Celkové ztráty v železe potom jsou :**  $P_{fe} = P_H + P_V$  ;  $P_{fe} \approx (1+1/f) * f^2 * I_{max}^2$

úměrné součinu čtverce frekvence a čtverce proudu.

**TO NAPŘÍKLAD ZNAMENÁ ŽE, JEDEN AMPÉR PÁTÉ HARMONICKÉ ZPŮSOBUJE STEJNÉ ZTRÁTY VÍŘIVÝMI PROUDY, JAKO PĚT AMPÉR ZÁKLADNÍ FREKVENCE.**

Jako typický příklad distorzního systému můžeme uvést třífázové polovodičové můstkové usměrňovače v šestipulzním zapojení, běžně užívané při regulaci motorů. Tento usměrňovač bude produkovat harmonické řádu:

$h = k * p \pm 1$  kde: k ... přirozené číslo

p ... počet usměrňovacích ventilů, v případě můstkového zapojení se 6 ventily:

$$h = k * 6 \pm 1$$

$$h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots$$

Teoretické amplitudy harmonických proudů jsou nepřímo úměrné řádu harmonické, to znamená:

$$I_5 = I_1 / 5 \text{ (20,0\%)}$$

$$I_7 = I_1 / 7 \text{ (14,3\%)}$$

$$I_{11} = I_1 / 11 \text{ (9,1\%)}$$

$$I_{13} = I_1 / 13 \text{ (7,7\%)}$$

$$I_{17} = I_1 / 17 \text{ (5,9\%)}$$

$$I_{19} = I_1 / 19 \text{ (5,3\%)}$$

...

V praxi se tyto hodnoty nepatrně liší podle impedance sítě.

Proud se uzavírá cestou nejmenší impedance, a tak jsou nejvíce přetěžovány komponenty s kapacitním charakterem, neboť:

$$Z_C = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} = \frac{-j}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Proto je nutné tyto chránit před nepříznivými účinky harmonických vkládáním induktivního prvku (tlumivky), jehož impedance naopak s rostoucím kmitočtem stoupá:

$$Z_L = j \cdot \omega \cdot L = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

Tím vznikne sériový rezonanční obvod, jehož kmitočet se ladí pod dominantní harmonickou. Tento obvod je charakterizován „**činitelem útlumu**“ (**p** v %), který odpovídá rezonančnímu kmitočtu podle vztahu:

$$p_{\%} = \left( \frac{f_1}{f_R} \right)^2 \cdot 100$$

Pro 3. h. (150 Hz) to je zpravidla 134 Hz, 5. h. (250 Hz) to je zpravidla 189 Hz, protože zde se musí vzít v úvahu ještě vysílací kmitočet HDO (v 90% 216 <sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz, pouze v části SČ 183 <sup>1</sup>/<sub>3</sub> Hz) – viz. PNE 33 3430-6, od kterého musí být dostatečný odstup, aby obvod neodsával tónovou frekvenci vysílače. Tento LC obvod pak i částečně tuto dominantní harmonickou filtruje a tím snižuje celkové zkreslení napětí THD U (z anglického “total harmonic distortion”) mnohdy pod kompatibilní úroveň.

Vlastní indukčnost tlumivky se vypočítá ze vztahu při rezonanci, to je při stavu, kdy tento LC obvod má nulovou impedanci ( $Z = 0$ ,  $R = 0$  a  $C$  je kapacita transfigurovaná z trojúhelníkového zapojení do hvězdy  $C = 3 \cdot C_N$ ):

$$\vec{Z} = R + j \cdot (X_L + X_C) = 0$$

$$0 = j \cdot \left( 2 \cdot \pi \cdot f_R \cdot L_N - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_R \cdot 3 \cdot C_N} \right)$$

$$L_N = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_R)^2 \cdot 3 \cdot C_N}$$

Harmonické proudy vzniklé ve jmenovaných usměrňovačích mají za následek zvýšené ztráty Joulovým teplem (ztráty v Cu), které se blíží přibližně k 8% avšak ztráty vířivými proudy mohou dosáhnout až 62%. Proto transformátory, které napájejí jmenované skupiny usměrňovačů, mají problémy se zahříváním, mnohem vyšším nežli by se dalo očekávat v případě, než když jsme počítali pouze s činnou složkou proudu, která jimi protéká. To vysvětluje skutečnost proč některé transformátory, které zásobují rektifikační skupiny, dosahují využití pouze z 50 - 70 % svého výkonu.

### III. Výhodnost kompenzace

Z předchozích kapitol je zřejmé, že eliminací harmonických proudů a vykompenzováním jalového výkonu se jednak vyhneme penalizaci ze strany energetických podniků (dodavatele elektrické energie) a dále ušetříme na ztrátách ve vedeních a snížíme úbytky a napětí na přenosové cestě, čímž můžeme dodatečně využít stávající možnosti distribučního rozvodu firmy.

Vykompenzováním odběru z původní hodnoty účinníku na hodnotu požadovanou (0,95 - 1,00) snížíme celkový proud a tím i ztráty na vedení, které jsou úměrné jeho čtverci podle výše uvedeného vztahu ( $P_J = Z \cdot I^2$ ). Pro jednoduchost budeme uvažovat pouze základní harmonickou. Z trojúhelníku proudů potom odvodíme velikost zdánlivého proudu (při stejné činné zátěži reprezentované impedancí  $Z$ ):

$$I_1 = \frac{I_c}{\cos \phi_1} \quad \text{před kompenzací}$$

$$I_2 = \frac{I_c}{\cos \phi_2} \quad \text{po kompenzací}$$

$$P_{J1} = Z \cdot I_1^2 \quad \text{ztráty Joulovým teplem na vedení před kompenzací}$$

$$P_{J2} = Z \cdot I_2^2 \quad \text{ztráty Joulovým teplem na vedení po kompenzací}$$

Ztráty snížené v důsledku vykompenzování odběru klesnou v procentech o (vztaženo k původnímu, nevykompenzovanému stavu):

$$\Delta P_{J\%} = \frac{(P_{J1} - P_{J2}) \cdot 100}{P_{J1}} = \frac{(I_1^2 - I_2^2) \cdot 100}{I_1^2} = \left( 1 - \frac{\cos^2 \phi_1}{\cos^2 \phi_2} \right) \cdot 100$$

Obdobně dojdeme ke vzorci vyjadřujícímu procentuální snížení úbytku napětí na přívodním vedení ke spotřebiči:

$$\Delta U = Z \cdot I$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{(\Delta U_1 - \Delta U_2) \cdot 100}{\Delta U_1} = \frac{(I_1 - I_2) \cdot 100}{I_1} = \left( 1 - \frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \right) \cdot 100$$

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty snížení úbytku napětí a ztrát v „mědi“ na přívodním vedení při vykompenzování odběru na hodnotu účinníku rovnou 0,95 (hodnoty jsou vztaženy ke stavu před kompenzací):

<b>cos φ<sub>1</sub></b>	-	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
<b>ΔU</b>	[%]	68,4	63,2	57,9	52,6	47,4	42,1	36,8	31,6	26,3	21,1	15,8	10,5	5,3
<b>ΔP<sub>J</sub></b>	[%]	90,0	86,4	82,3	77,6	72,3	66,5	60,1	53,2	45,7	37,7	29,1	19,9	10,2

### Zásady pro návrh kompenzačního prostředku:

Kompenzační zařízení musí být navrženo vzhledem k prostředí, ve kterém bude pracovat, to je zejména odvislé od technologického vybavení firmy. Proto je potřeba získat co možná největší přehled a informace o daném odběru. V následujícím přehledu jsou uvedeny některé charakteristické prvky odběrů:

- pomalé změny odebíraného výkonu
- rychlé změny (mžikové) odebíraného výkonu (bodovky, jeřáby, rychlozdviže, ...) obvykle doprovázené výskytem harmonických, protože spínání se například provádí bezkontaktními polovodičovými prvky
- administrativní budovy s počítačovými sítěmi

- objekty s rozsáhlými osvětlovacími soustavami
- linky s řízenými pohony
- těžký hutní provoz s tavicími pecemi (obloukové, indukční, odporové s řízené polovodiči, ...)

Komplexní přehled o denním diagramu zatížení a obsahu harmonických získáme prostřednictvím měření síťovým analyzátozem, z údajů digitální měřicí soupravy energetiky a z odběrových diagramů či faktur za odebranou elektrickou energii. Na základě těchto hodnot se s určitou rezervou navrhne výkon kompenzační baterie a podle kolísání odběru se stanoví nejmenší stupeň a optimální řízení výkonu. Jednotlivé stupně je třeba zkontrolovat na možnost rezonance s napájecím transformátorem, respektive na možnost odsávání frekvence HDO.

Vhodným měřítkem pro zhodnocení vlivu měničů a ostatních zdrojů harmonických je tzv. „**Zkratové číslo**“ (**ZČ**), které je definováno jako poměr zkratového výkonu v místě připojení odběru ku zdánlivému výkonu všech zdrojů harmonických. Pokud je toto číslo:

- **větší než 200** je riziko vlivu harmonických **malé** a lze použít nechráněný kompenzační rozváděč
- **v intervalu 200 až 100** je míra rizika **střední** a je nutné použít chráněný kompenzační rozváděč
- **menší než 100** je toto riziko již **veliké** a je nutné použít laděné filtry k eliminaci harmonických

#### Příklad:

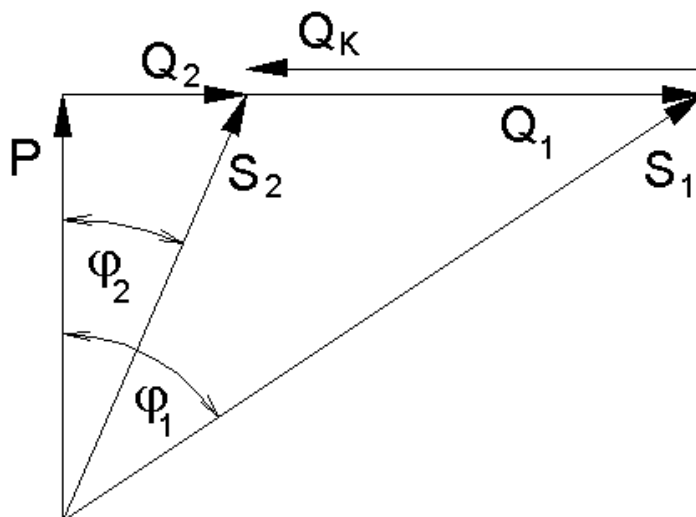
Mějme odběratele napájeného transformátorem 1,6 MVA s napětím nakrátko  $e_K = 5\%$ , který má na sekundární straně připojeny regulované pohony o celkovém výkonu 250 kVA.

$$Z\check{C} = \frac{S_T}{e_K * S_p} = \frac{1600}{0,05 * 250} = \underline{128}$$

Vidíme, **ZČ** že je v rozmezí **100 – 200**, jedná se tudíž o středně velké riziko vlivu harmonických, proto bude „nasazeno“ chráněné kompenzační zařízení.

#### Stanovení výkonu kompenzačního zařízení:

Z naměřených hodnot bez kompenzace, respektive z hodnot uvedených v projektu (veličiny označené indexem 1) a požadovaných hodnot (index 2) vypočteme potřebný kompenzační výkon baterie. Na následujícím obrázku je znázorněn fázový diagram před a po instalaci kompenzační baterie při stejném činném výkonu.



$$Q_K = Q_1 - Q_2 = P * ( \operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2 )$$

Ekonomická výhodnost kompenzace jalové energie a její rychlá návratnost je patrná při eventuelním porovnání faktur za odebranou elektrickou energii v případě kompenzovaného a nekompenzovaného odběru.

Při nedodržení podmínek stanovených v platné Sbírce zákonů, cenových rozhodnutí ERÚ, prováděcích pokynů k těmto dokumentům a hodnot uvedených v přihlášce (smlouvě) k odběru elektřiny je připočítávána cenová přírážka za nedodržení neutrální hodnoty účinníku.

Při měření v reálném čase je penalizována i nevyžádaná dodávka jalové energie (tj. překompenzování). Proto je nutné, aby kompenzační baterie byla osazena skutečně kvalitním regulátorem jalového výkonu s co nejvyšší citlivostí.

Další úsporou je eliminace ztrát ve vedeních, transformátorech a ostatních prvcích přenosové cesty, dodatečným využitím odlehčených vedeních a podobně.