

ZLEPŠENÍ ÚČINÍKU V ENERGETICE A NÁVRH VHODNÝCH KOMPENZAČNÍCH PROSTŘEDKŮ

Ing. Miloš Molnár, EMCOS s.r.o., Teplice, m.molnar@emcos.cz

Řada elektrických spotřebičů provozovaných v elektrické síti odebírá kromě činného výkonu také výkon jalový, ve většině případů induktivního charakteru.

Zanedbáme-li další složky výkonu (deformační, pulzační a skrytý), můžeme definovat účinník odběru jako poměr výkonu činného P a zdánlivého S , tj. $\cos\varphi = P/S$.

Činný výkon je definován $P = S \cdot \cos\varphi$, jalový výkon $Q = S \cdot \sin\varphi$.

Kompensací jalového výkonu pak rozumíme snížení odběru induktivního jalového výkonu pomocí dodatečných technických opatření na předepsanou hodnotu, tj. požadovaný účinník v rozmezí $\cos\varphi = 0,95-1$.

Zde bych rád upozornil na technické a ekonomické důsledky odběru činného výkonu se špatným účinníkem, na možné problémy vznikající při návrhu a provozování kompenzačních zařízení a navrhl možné způsoby řešení této problematiky.

Pozn. – pod pojmem účinník budeme v tomto příspěvku rozumět tzv. klasický účinník (definovaný jako kosinus fázového posunu mezi 1. harmonickou napětí a proudu) a ne tzv. *správný účinník* λ , který uvažuje i ostatní newattové výkony trojfázové soustavy zatěžované nesouměrně nesinusovými proudy, tj. výkon deformační (způsobený zkreslením proudu harmonickými), výkon pulzační (způsobený zpětnou složkou proudu 1. harmonické) a výkon skrytý (způsobený nulovou složkou proudu 1. harmonické).

SPOTŘEBIČE JALOVÉHO VÝKONU

Asynchronní motory

Asynchronní motory jsou jedním z rozhodujících spotřebičů jalového induktivního výkonu potřebného k vytvoření točivého magnetického pole statoru a k pokrytí rozptylového magnetického toku. Štítkový údaj účinníku se vztahuje ke jmenovitému zatížení, hodnota závisí na konstrukci motoru (např. kroužkové motory nebo pomaloběžné mají horší účinník oproti motorům s kotvou nakrátko nebo rychloběžným). Podstatné je zvětšení odebíraného jalového výkonu a zhoršení účinníku s klesajícím zatížením motoru, zvláště při chodu naprázdno (60-70% příkonu motoru při plném zatížení).

Celkový odebíraný jalový výkon Q je tvořen z jalového výkonu při chodu naprázdno Q_0 a z proměnného jalového výkonu Q_z , který se zvětšuje se čtvercem poměrného zatížení motoru, tj. $Q = Q_0 + Q_z \cdot (P/P_N)^2$, kde P_N je jmen. výkon motoru.

Asynchronní generátory

Asynchronní generátory odebírají z rozvodné sítě značný jalový indukční výkon pro vytvoření magnetického pole.

Transformátory

Celkový odebíraný jalový výkon Q je tvořen z jalového výkonu při chodu naprázdno Q_0 , který je asi 1-3,5% jmenovitého výkonu transformátoru a z proměnného jalového výkonu pro pokrytí rozptylového magnetického toku, který se zvětšuje se čtvercem zatížení transformátoru,

$$\text{tj. } Q = Q_0 + u_K \cdot (I/I_N)^2 \cdot S_N,$$

kde $S_N (I_N)$ je jmen. výkon (proud) transformátoru.

Hodnota účinníku při chodu transformátoru naprázdno je velmi malá, $\cos\varphi_0 = 0,1-0,2$, tj. čistě jalové zatížení. Proto se vyžaduje kompenzace jalového proudu naprázdno transformátorů středo- a velkoodběratelů s měřením jalové energie na sekundární straně transformátoru.

Při průměrném zatížení 70% se celkový jalový výkon transformátoru pohybuje 4-6% jmenovitého výkonu transformátoru.

Střídavé elektrické obloukové pece, pánvové pece, indukční pece

Tato zařízení jsou jedna z nejproblematictějších z hlediska jejich zpětných vlivů na síť. Kromě odběrů výkonů s nízkými hodnotami účinníku vykazují velkou proměnlivost odebíraného výkonu, která způsobuje kolísání napětí (blikání, flicker), generování vyšších harmonických proudů a nesymetrii odběru.

Stabilní hoření a dosažení požadovaného výkonu na oblouku je podmíněno účínkem mezi $\cos\varphi_o = 0,7-0,86$.

Symetrizaci odběru jednofázových pecí lze řešit vhodným přidáním tlumivek a kondenzátorů na svorky pece tak, aby tvořily třífázový spotřebič zapojený do trojúhelníku.

Výkonové polovodičové měniče

Jedná se o řízené a neřízené usměrňovače, měniče frekvence se stejnosměrným meziobvodem (napět'ovým nebo proudovým), přímé měniče frekvence, fázově řízené střídavé spínače apod.

Různé typy měničů se z hlediska odběru jalového výkonu liší, např. řízený polovodičový usměrňovač pro řízení ss motorů pracuje s účínkem $\cos\varphi = 0,5$ i horším, avšak střídač s neřízeným usměrňovačem na vstupu a ss napět'ovým meziobvodem s šířkovou pulsní regulací napětí pro řízení otáček asynchronního motoru může pracovat s účínkem $\cos\varphi = 0,95$ apod. Pro řízený polovodičový usměrňovač pro regulaci ss motorů platí, že účínkem se zhoršuje s hloubkou regulace otáček a nepřímo s velikostí ss napětí naprázdno U_{d0} při úhlu řízení tyristorů $\alpha = 0$.

Ostatní spotřebiče jalového výkonu

Jedná se zejména o výbojková a zářivková svítidla, svařovací transformátory navíc s rychle se měnícím odebíraným jalovým výkonem (svařovací lisy, bodovky), reaktory pro omezení zkratových proudů apod.

Venkovní a kabelová vedení

Vedení spotřebují poměrně málo jalové energie, a to vlivem své indukčnosti a kapacity. U venkovních vedení (pod 200km) převládá indukční složka a kapacitní je zanedbatelná. U kabelových vedení převládá naopak vliv kapacity (kapacita roste čím větší je průřez žil). Tato vlastnost kabelových sítí může vést při nesprávně provozovaných kompenzačních zařízeních (tj. trvale překompenzovaných) k nebezpečnému nárůstu kapacitního výkonu hlavně v sítích VN.

DŮSLEDKY ODBĚRU VÝKONU SE ŠPATNÝM ÚČÍNKEM

Následkem špatného účinníku je v elektrizační soustavě nutný přenos činného i jalového výkonu (obecně i výkonu deformačního, pulzačního a skrytého), tj. tzv. zdánlivého výkonu, který je větší než potřebný výkon činný.

Tento zdánlivý výkon ve svém důsledku způsobuje:

- **zvýšení nákladů na prvky elektrizační soustavy**, tj. vedení, transformátory, elektrické rozvodny apod. musí být dimenzovány na velikost zdánlivého proudu, který je $1/\cos\varphi$ krát větší než proud činný
- **snížení využití generátorů** - jalový induktivní proud odběru zeslabuje buzení generátoru a je třeba zvýšit budící proud, tím dochází ke zvětšení tepelných ztrát v rotoru a budiči a ke zvýšení zkratového proudu při poruše. Opačná situace vzniká při překompenzování v odlehčené síti, neboť značně odbuzený stroj by mohl vypadnout ze synchronismu a způsobit zvýšení horní přípustné hodnoty napětí; proto je nutné pracovat s induktivním účínkem $\cos\varphi = 0,95$ až $0,98$.
- **zvýšení tepelných ztrát** v ohmických odporech prvků el. soustavy, které jsou závislé na druhé mocnině zdánlivého proudu, tj. rostou s druhou mocninou převrácené hodnoty účinníku (např. při $\cos\varphi = 0,7$ jsou dvakrát větší než při $\cos\varphi = 1$)
- **zvětšení úbytku napětí v síti** způsobený zdánlivým proudem I s fázovým posunem φ na impedanci sítě, tj. na činném odporu R a reaktanci X je $\Delta U = RI \cos\varphi + XI \sin\varphi$

- **zhoršení zkratových poměrů v síti** způsobené zvýšením buzení generátorů, tj. dochází ke zvětšení nárazového zkratového proudu a nesymetrické ss složky a v důsledku toho ke zhoršení vypínacích podmínek a namáhání vypínačů.

ZPŮSOBY ZLEPŠOVÁNÍ ÚČINÍKU

Zlepšování účinníku, tzn. zmenšení jalového induktivního odběru, lze provést dvojím způsobem:

- **správným návrhem a provozováním zdrojů, přenosové soustavy a spotřebičů**, tzn. správné dimenzování transformátorů, správná volba jmen. napětí, využití synchronních motorů a zejména správné dimenzování asynchronních motorů a omezení jejich chodu naprázdno, odstranění nevhodných regulačních pohonů
- **použitím kompenzačních zařízení**, které jsou zdrojem jalového kapacitního výkonu.

KOMPENZAČNÍ ZAŘÍZENÍ DĚLÍME

podle principu činnosti

- **rotační** (synchronní kompenzátor)
- **statické** (kondenzátor připojený přímo na síť nebo hrazený tlumivkou, kompenzační filtr tvořený sérioparalelním zapojením L – C, příp. i rezistorů)
- **polovodičové** (např. proudový měnič s nucenou komutací a kondenzátorem ve ss obvodu – viz. aktivní filtry)

podle způsobu regulace

- **kompenzátory s konstantním výkonem**, tj. neregulované kondenzátorové baterie nebo
- kompenzační filtry spínané samostatným spínačem nebo společně s kompenzovaným spotřebičem
- (individuální kompenzace asynchronních motorů nebo transformátorů)
- **kompenzátory se stupňovitou regulací**, tzn. samostatně spínané kondenzátory pomocí stykačů NN (speciální stykače pro spínání kapacit) ovládaných regulátorem účinníku moderní konstrukce (např. NOVAR, ESTAmat-Roedersein, Frako, Lovato, Circutor) nebo bezkontaktních polovodičových spínačů se speciální regulací pro omezení přechodných dějů při spínání kondenzátorů (např. kompenzátor STYKOS s rychlým regulátorem EMCOS EFR7); pro VN pomocí vakuových vypínačů nebo stykačů
- **kompenzátory s plynulou regulací**, jedná se o synchronní kompenzátory, statické kompenzátory (popř. s filtry jednotlivých harmonických) doplněné paralelně připojenou dekompenzační fázově řízenou tlumivkou (TCR+FC), dále se jedná o polovodičové kompenzátory
- **aktivní filtry** – nový technický prostředek umožňující eliminovat energetické rušení, zejména kolísání napětí v provozech s výraznými dynamickými odběry jalového výkonu (např. svařovny, obloukové pece apod.) a současně snižovat obsah harmonických. V principu se jedná o sériově nebo paralelně zapojené generátory proudu či napětí tvořené můstkovým zapojením polovodičových spínačů (statický měnič na bázi IGBT tyristorů s napěťovým zdrojem tvořeným kondenzátory). Vhodným regulačním systémem pak v případě „paralelního zapojení“ filtru přes vazební tlumivku injektuje tento statický měnič do místa připojení zbytkovou křivku proudu, tj. rozdíl mezi ideální sinusovou křivkou proudu (soufázovou s křivkou napětí) a křivkou proudu odebíraného kompenzovaným spotřebičem. V případě „sériového zapojení“ přes vazební tlumivku a vazební transformátor zlepšuje měnič křivku napájecího napětí. Kombinací obou zapojení a zařazením pasivního filtru (dolní propust) mezi vývody aktivního filtru a napájecí síť lze řešit složité případy pro dosažení EMC (nesymetrie odběrů, filtrace proudu nulovým vodičem apod.)

podle umístění kompenzátoru

- **individuální**, kdy je kondenzátor připojen přímo na svorkách spotřebiče jalového výkonu nebo je společně s ním připínán k síti samostatným stykačem (vhodné pro velké motory, které pracují delší dobu nebo trvale) – nutná vhodná volba kompenzačního výkonu, nebezpečí samobuzení a přepětových jevů
- **skupinová**, kdy je regulovaný kompenzátor připojen na přípojnicích rozváděče skupiny spotřebičů, vzhledem k soudobosti chodu spotřebičů vychází kompenzační výkon menší
- **centrální**, regulovaný kompenzátor je připojen na přípojnice vstupní trafostanice, vzhledem k soudobosti chodu spotřebičů vychází kompenzační výkon opět menší
- **smíšená**, tj. kombinace dříve uvedených způsobů

○

Nejčastěji používaná zapojení statických kompenzátorů

- **nehrazená kondenzátorová baterie** je převážně používaná; v síti s výskytem harmonických může však docházet k rezonancím s indukčností sítě a ohrožení kondenzátoru i paralelně připojených spotřebičů, není omezena velikost nabíjecího proudu při připnutí k síti; měrné ztráty jsou max. 0,5W/kvar.
- **hrazená kondenzátorová baterie** je tvořena sériovou kombinací tlumivky a kondenzátoru, obvod je laděn na rezonanční kmitočet, na kterém se v síti nevyskytují harmonické (např. 189Hz, $p=7\%$) a hradící účinek tlumivky zabraňuje rezonančním jevům v síti; měrné ztráty jsou vyšší - max. 5,5 až 7W/kvar. Kondenzátory nutno dimenzovat na vyšší hladinu napětí, neboť vlivem tlumivky dochází ke zvýšení napětí na kondenzátoru.
- pro vytvoření **filtru harmonických** je nutno obvod naladit na kmitočet vybraných harmonických generovaných nelineárními spotřebiči (měniče, obloukové pece atd.), obvyklý kmitočet je 250, 350, 550, 650Hz. Kondenzátory nutno dimenzovat na vyšší hladinu napětí (+10%) a je nutné počítat při dimenzování tlumivky i se zvýšeným zatížením harmonickými proudy odsávanými ze sítě.
- **tyristorově řízená tlumivka + pevná kondenzátorová baterie (TCR+FC)** – zdrojem kapacitního výkonu je soustava paralelně řazených kompenzačních filtrů; proud paralelně zapojené dekompenzační tlumivky, která odebírá ze sítě jalový induktivní výkon, je regulován fázově řízeným měničem. Výhodou zapojení je plynulá a rychlá regulace kompenzačního výkonu (doba odezvy je 2-10ms). Používá se v sítích NN i VN s použitím speciálního regulátoru pro kompenzování i nesymetrických odběrů.

Nejčastější způsoby spínání statických kompenzátorů NN

- **stykač (AC3)** – přechodný proudový děj při spínání kondenzátoru není omezen, závisí na zkratových poměrech v síti, na impedanci vedení a okamžiku sepnutí. Amplituda nabíjecího proudu jednoho připínaného stupně při zkratovém proudu 10-50kA bývá 200 až 1200A, amplituda nabíjecího proudu dalšího připínaného stupně, kdy je v chodu podstatná část kondenzátorů kompenzačního zařízení, je omezena pouze impedancí vodičů uvnitř rozváděče bývá 1300-2500A. Stykače pro třídu AC3 dovolují proudové přetížení do výše 10-ti násobku jmenovitého proudu, tj. prakticky do 250 až 1000A (běžně používané stykače s $I_N=25-100A$), elektrická životnost zařízení je malá (běžně řádově 10^4 sepnutí při 400V). Proudový ráz při spínání nutno omezit na přijatelnou hodnotu zvýšením impedance přívodů ke kondenzátorům, tj. např. vzduchovou tlumivkou ($>10-100\mu H$) nebo odporem ($>1\Omega$).
- **stykač pro spínání kondenzátorů (odporové spínání)** – V současné době je na našem trhu několik typů speciálních stykačů pro spínání kapacit s odporovým omezením nabíjecího proudu kondenzátoru (např. firmy Telemecanique, Benedikt-Jäger, Klöckner-Moeller, GE-Agut, EP Modřany, Lovato atd.). Spínání probíhá postupně - nejdříve přes odpor pomocí předstihového kontaktu a po odeznění přechodného děje hlavní kontakt přebírá ustálenou hodnotu proudu kondenzátoru. Stykače některých výrobců (Telemecanique, Benedikt-Jäger) po sepnutí hlavních kontaktů uvolní předstihový kontakt a zamezí tak možné havárii stykače při poruše hlavního kontaktu. Proudový ráz při spínání je u těchto stykačů omezen a je zaručena vysoká elektrická životnost zařízení (běžně 3×10^5 sepnutí při 400V – stykač Telemecanique).

- **bezkontaktní polovodičový spínač** – Tyto spínače jsou určeny pro okamžité spínání kondenzátorů ve speciálních tzv. rychlých kompenzátorech. Jejich předností je řízený okamžik sepnutí v okolí průchodu napětí na spínači nulou, spínání probíhá bez přechodného proudového děje a umožňuje opakované sepnutí v časech jedné periody síťového kmitočtu (20ms) při regulaci rychlých impulzních odběrů. Tyto spínače spolu s rychlými regulátory EFR7 jsou použity v rychlých bezkontaktních kompenzátorech STYKOS (řada ES) vyráběných firmou EMCOS.

VLIV KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ NA NAPÁJECÍ SÍŤ

Rezonanční jevy

Vlivem kapacitního charakteru hlavně venkovních sítí VVN a kabelových sítí VN dochází na některém rezonančním kmitočtu ke změně původně indukčního charakteru impedance elektrické sítě základní harmonické na kapacitní. Protože se v síti vyskytují soustředěné kapacity v podobě nehrazených kondenzátorových baterií dochází k rezonancím i v sítích NN, tlumení rezonančního obvodu je menší než u sítí bez soustředěných kapacit a rezonance se většinou posunuje k nižším kmitočtům.

Pokud se v síti budou provozovat nelineární spotřebiče, které generují harmonické proudy na kmitočtech blízkých rezonančnímu kmitočtu, dojde k zesílení těchto harmonických proudů vlivem paralelní rezonance. Značným zdrojem harmonických začínají být provozované větší počítačové sítě, které vzhledem k synchronnímu režimu spínaných zdrojů silně deformují křivku proudu a navíc způsobují proudové přetížení středního vodiče (naměřené hodnoty $I=P/S=0,5$). Harmonické proudy dále zatěžují transformátor, nadřazenou síť a vlastní nehrazené kompenzační zařízení, které bývá dimenzováno na zatížení pouze základní harmonické a může proto dojít k jeho zničení. Dále dochází v uzlu harmonické v okolí rezonančního kmitočtu ke zvýšení harmonických napětí a následně k rušení připojených spotřebičů. Rezonanční kmitočet se bude měnit v závislosti na počtu připnutých kompenzačních stupňů.

Rezonanční kmitočet lze určit přibližně podle vzorce:

$f_r = 50\sqrt{(S_K/Q)} \approx 50\sqrt{(S_T/e_K \cdot Q)}$, kde f_r je rezonanční kmitočet, S_K je trojfázový rázový zkratový výkon v uzlu, Q je výkon kondenzátorové baterie, S_T je výkon transformátoru, e_K je napětí nakrátko transformátoru.

Nebezpečnému proudovému přetížení kompenzačních zařízení je nutno předcházet vhodnou konfigurací sítě, např. nepřipustit překompenzování a kompenzaci při nízkém činném zatížení.

Rezonance jsou účinně tlumeny některými spotřebiči jako jsou žárovky, odpory a hlavně asynchronní motory. Dalším účinným prostředkem pro omezení rezonancí je zatlumení tj. předřazení tlumivky před kondenzátorovou baterií, a to takové velikosti, aby rezonanční kmitočet obvodu byl nižší než rezonanční kmitočet odpovídající reaktanci napájecí sítě a současně mimo některý budící kmitočet.

Prakticky lze obvod ladit na kmitočet nižší než 3. harmonická (např. 120Hz), nebo na okno mezi nejvýraznějšími rezonancemi 3. a 5. harmonické, tj. na kmitočet 189Hz - použit je ve chráněných (hrazených) kompenzátorech F-KOM a STYKOS firmy EMCOS a většiny dalších výrobců. Chceme-li laděný obvod provozovat jako sací filtr, nutno jej ladit na kmitočet blízký rezonančnímu a danou tlumivku a kondenzátor vhodně dimenzovat. Stupňové chráněné kompenzátory mají pouze částečný filtrační účinek (závislý kromě naladěného kmitočtu i na jakosti tlumivek), jejich ochranné tlumivky hlavně snižují riziko rezonancí.

Hrazení kmitočtu HDO

Vybrané spektrum vysílaných kmitočtů v ČR (stav k 31.12.96):

183,3Hz, 216,6 Hz, 283,3 Hz, 425 Hz, 760 Hz, 1060 Hz.

Impedance kompenzačních kondenzátorů klesá nepřímou úměrou s kmitočtem $X_C = 1/\omega C$ a způsobuje nadměrné pohlcování signálu HDO. Ve srovnání s impedancí sítě (která má v daném

rozmezí převážně induktivní charakter) mohou vznikat místa se značným potlačením signálu HDO (pod 2V) a naopak i místa s rezonančním zesílením (nad 20V), zvláště citlivé jsou sítě s provozovaným vyšším kmitočtem (425Hz a zejména 1060Hz). Je proto nutné v těchto případech doplnit kompenzační zařízení popř. i jednotlivé kompenzační stupně tzv. zádržemi signálu HDO (vhodné jsou transformátorové zádrže).

Dle posledních informací **provozuje SČE síť HDO** též na kmitočtu **183,3 Hz** (Babylon, Chotějovice, Litoměřice), tento kmitočet ohrožuje dosud instalované chráněné kompenzace laděné na 189 Hz (činitel zacívkování $p=7\%$) a signál HDO bude těmito laděnými obvody výrazně odsáván! **Tento kmitočet HDO byl zvolen velmi nevhodně a bez znalosti současného trendu chráněných kompenzací, jejichž počet aplikací bude vzhledem k charakteru spotřebičů neustále narůstat.**

Přechodné děje při spínání a vypínání kondenzátorů

Přechodný proudový děj při spínání kondenzátoru závisí na zkratových poměrech v síti, na impedanci vedení a okamžiku sepnutí. Amplituda nabíjecího proudu jednoho připínaného stupně při zkratovém proudu 10-50kA bývá 200 až 1200A, kde nižší hodnoty platí pro menší kondenzátory ($<100\mu\text{F} \approx 5\text{kvar}$) a nižší zkratové poměry v síti, vyšší hodnoty platí pro větší kondenzátorové baterie (např. 50kvar) připojené blízko napájecím transformátorům.

Amplituda nabíjecího proudu dalšího připínaného stupně, kdy je v chodu podstatná část kondenzátorů kompenzačního zařízení, je omezena pouze impedancí vodičů uvnitř rozváděče ($R < 10^{-3}\Omega$, $L < 10\mu\text{H}$) a bývá 1300 až 2500A. Tyto proudové rázy mají krátké trvání (několik period kmitočtu řádu kHz), ale jejich velikost rozrušuje materiál kontaktů stykače, neboť vznikají v okamžiku, kdy se kontakty dotýkají ještě pod malým tlakem a jejich kontaktní plocha je malá, takže přechodný odpor je velký. To má za následek značné ohřátí materiálu kontaktů, jejich místní roztavení což dále zhoršuje jejich styk na počátku sepnutí a vede k dalšímu zvýšení teploty kontaktů.

Životnost běžného stykače (AC3) se tak značně snižuje, dochází ke spékání kontaktů a následně vlivem trvale připnutého kompenzačního výkonu ke zvýšení napětí a příp. k havárii zařízení. Současně jsou proudové a přepětové rázy takto připínaných kondenzátorů zdrojem značného rušení a jejich šířením po vedení a interakcí do řídicích obvodů technologických počítačů mohou být způsobeny poruchy některých zařízení.

Pro omezení proudového rázu při sepnutí je nutno zapínat kondenzátory přes vzduchovou omezovací tlumivku nebo přes odpor.

Po vypnutí zůstává na kondenzátoru elektrický náboj až o velikosti amplitudy provozního síťového napětí ($\sqrt{2} \cdot U_n$). Mezi kontakty přístroje se při jejich rozpojení může vyskytnout až dvojnásobek amplitudy síťového napětí a při pomalém odpínání kontaktů (např. ručního vypínače, odpojovače) může dojít ke vzniku oblouku a k opětovnému připnutí kondenzátoru, dochází k ještě větším nadproudům a následnému přepětí, příp. průrazu kondenzátoru a zničení přístroje.

Pro snížení zbytkového elektrického náboje a napětí na kondenzátoru po jeho vypnutí je nutné náboj vybit např. pomocí rychlovybíjecích odporů; zbytkové napětí v okamžiku opakovaného sepnutí téhož kondenzátoru nesmí překročit 10% jmenovitého napětí.

Samobuzení

Jedná se o zvláštní případ ferorezonance a vzniká paralelním připojením kondenzátoru a statoru indukčního motoru nebo generátoru, tzn. sériové zapojení rozptylové reaktance statoru a kapacity.

Při individuální kompenzaci, při níž je kondenzátor trvale připojen na svorky motoru, se rotor po vypnutí motoru (s kondenzátorem) vlivem setrvačných hmot (setrvačného momentu GD^2) otáčí a dobíhá. Kondenzátor se vybíjí přes stator motoru a dodává mu magnetizační energii pro vytvoření elektromagnetického pole. Naindukovaný proud v rotoru vyvolává ztráty v železe a v mědi, rotor se účinně brzdí – z asynchronního motoru se stává asynchronní generátor. Napětí na kondenzátoru rychle klesá, při určité rychlosti může dosáhnout rezonanční frekvence, vybije se naráz a rotor se okamžitě zabrzdí. Současně vzniká přepětový ráz několikanásobku U_n , který ohrožuje motor i kondenzátor, mechanický náraz namáhá vinutí a hřídel motoru. Tato situace vzniká při podsynchronních kritických otáčkách, přepětí vlivem samobuzení vniká však již v okamžiku vypnutí motoru. Velkým nebezpečím

je opětné připnutí dobíhajícího motoru k síti, kdy je velká pravděpodobnost nesouhlasu fází mezi napětím sítě a napětím od samobuzení.

Zkušenost ukázala, že volbou velikosti kondenzátoru na 55% jmenovitého jalového výkonu motoru (při jmenovitém zatížení na $\cos\varphi = 1$), tj. asi 90% magnetizačního výkonu při chodu naprázdno, nevzniká na svorkách motoru téměř žádné napětí a je vyloučeno samobuzení.

Vyloučení samobuzení při provozování asynchronních generátorů je nutno zajistit okamžitým odepnutím kondenzátorů při odpojení generátoru od sítě.

ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA (EMC)

Elektromagnetická kompatibilita znamená schopnost elektrického zařízení pracovat bez závad v prostředí, kdy kromě žádaných elektrických veličin (napětí, proudů, signálů, ...) do něj vstupují i signály nežádoucí, rušivé. Současně však může toto zařízení nadměrně ovlivňovat své okolí nežádoucími elektrickými jevy (vyzařováním elektromagnetického pole apod.)

Kompatibilita (slučitelnost) elektrických obvodů a sítí byla v minulosti v různém rozsahu řešena na úrovni národních předpisů. V současné době se do systému norem ČSN přebírají mezinárodní normy (IEC) a evropské normy (EN), většinou přímým překladem. Výčet těchto norem je nad rámec tohoto referátu, je zde uvedeno pouze informativní členění norem řady IEC 1000 a v příloze výběr nejdůležitějších článků z normy ČSN EN 6100-2-4 (Kompatibilní úrovně pro nf rušení šířené vedením v průmysl. závodech).

V zemích EU platí od 1.1.1995 zákon, který řeší připojovací podmínky spotřebičů k elektrické síti a nedovolí připojit spotřebiče, které na ni mají zpětný vliv – tzn. jsou zdrojem harmonických. Veškeré statické kompenzátory musí mít předřazenou ochrannou tlumivku.

V normě ČSN 33 3430, případně ČSN EN 50 160 jsou uvedeny mezní hodnoty jednotlivých vyšších harmonických a celkového zkreslení sinusové křivky napětí na jednotlivých úrovních napěťových hladin.

IEC 1000

Část 1: Všeobecně

Část 2: Prostředí

Část 3: Meze

Část 4: Zkušební technika

Část 5: Směrnice o instalacích a zmírňování vlivů

Část 9: Různé

Třídění

Všeobecné úvahy (úvod, základní principy); Definice, terminologie

Popis a třídění prostředí; Kompatibilní úrovně

Meze vyzařování a odolnosti

Měřicí a zkušební technika

Metody a prostředky zmírnění vlivů

ČSN EN 61000-2-4 Elektromagnetická kompatibilita (eqv. IEC 1000-2-4)

Část 2: Prostředí

Oddíl 4: Kompatibilní úrovně pro nf rušení šířené vedením v průmysl. závodech

Tato norma se týká dodávky elektrické energie NN a VN o kmitočtu 50/60Hz, dále se zabývá odchylkami parametrů napětí, které mohou být očekávány v napájecím bodě uvnitř závodu (IPC) v průmyslových a jiných neveřejných sítích. Kompatibilní úrovně jsou uvedeny pro různé třídy elektromagnetického prostředí.

Definice:

- **elektromagnetická kompatibilita (EMC)** znamená schopnost zařízení nebo systému fungovat vyhovujícím způsobem ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřijatelného elektromagnetického rušení čehokoliv v tomto prostředí
- **elektromagnetická kompatibilní úroveň** – předepsaná maximální úroveň elektromagnetického rušení, o němž se předpokládá, že bude ovlivňovat přístroje, zařízení nebo systémy provozované v konkrétních podmínkách
- **celková úroveň rušení** - úroveň daného elektromagnetického rušení způsobeného superpozicí emisí ze všech jednotlivých zařízení dané sítě
- **napájecí bod (PC)** – bod, v kterém má být vzata v úvahu EMC
- **společný napájecí bod (PCC)** – bod veřejné rozvodné el. sítě, ve kterém je nebo má být připojena vyšetřovaná síť
- **napájecí bod uvnitř závodu (IPC)** – napájecí bod uvnitř vyšetřované sítě nebo instalace

Třídy elektromagnetického prostředí:

- **Třída 1** se týká chráněných napájení a má kompatibilní úroveň nižší než úroveň pro veřejné rozvodné síť. To se týká zařízení velmi citlivého na rušení v rozvodné síti (např. přístrojové vybavení laboratoří, některých ochranných a automatizačních zařízení, počítačů atd.- obecně se jedná o zařízení napájené z UPS).
- **Třída 2** se týká bodů PCC a IPC všeobecně v průmyslovém prostředí. Kompatibilní úroveň jsou identické s úrovněmi pro veřejné rozvodné síť, proto v této třídě mohou být navrhovány prvky pro použití ve veřejných rozvodných sítích.
- **Třída 3** se týká jenom bodů IPC v průmyslovém prostředí. Tato třída má pro některé jevy rušení vyšší kompatibilní úroveň než *třída 2* a měla by se uvažovat např. je-li splněna jakákoliv z těchto podmínek
 - převážná část zátěže je napájena přes měniče
 - jsou provozovány svařečky (svařovací lisy, bodovky)
 - velké motory jsou často rozbíhány
 - zatížení se rychle (impulzně) mění

Pozn:

Napájení velmi rušících zařízení (obloukové pece, velké měniče ap., „drsné“ prostředí) je nutné z vyčleněných přípojnic (samostatný transformátor); úroveň rušení překračují často *třídu 3* a je nutné kompatibilní úroveň rušení odsouhlasit.

Kondenzátory pro kompenzaci účinníku by se měly připojovat k IPC *třídy 3* vždy přes sériové reaktory; kde však byla jasně prokázána nepřítomnost rezonančních účinků a hodnoty harmonických vyšších řádů jsou mnohem menší než hodnoty dané pro *třídu 3* nemusí být sériové reaktory nezbytné, nutná je kontrola po aplikaci nehrazeného kompenzátoru.

POSTUP PŘI VOLBĚ A NÁVRHU KOMPENZAČNÍCH ZAŘÍZENÍ

Pro správný a optimální návrh kompenzačního zařízení je nutné získat maximální informace o kompenzovaném odběru a síti, do které bude zařízení připojeno. Jedná se zejména o průběh činného a jalového výkonu kompenzovaných spotřebičů, úroveň harmonických proudů a napětí v uzlu připojení kompenzátoru, zkratový výkon atd. Z těchto podkladů se stanoví požadavky na parametry kompenzátoru, tj. kompenzační výkon, způsob a rychlost regulace a spínání kompenzačních stupňů, řešení s hradicí tlumivkou nebo jako filtr atd.

V případě kompenzace stávajícího provozu lze většinu těchto potřebných údajů získat měřením. Servisní technici naší firmy mají dlouholeté zkušenosti s návrhy kompenzačních zařízení a mohou vám rychle pomoci při odstraňování poruch v rozvodných soustavách - rezonanční jevy, rušení, výskyt harmonických atd. V případě kompenzace stávajícího provozu lze většinu těchto potřebných údajů získat měřením.

Podrobnější informace jsou v příspěvku „Kompenzační rozváděče Emcos s.r.o., novinky ve výrobním programu, servisní služba“.

Kompatibilní úrovně (ČSN EN 61000-2-4)

<i>Rušení</i>	<i>Třída 1</i>	<i>Třída 2</i>	<i>Třída 3</i>
Změny napětí, odchylky od jmen. napětí U_n ; $\Delta U / U_n$	$\pm 8\%$	$\pm 10\%$	+10 až +15%
Poklesy napětí, odchylky od jmen. napětí U_n ; $\Delta U / U_a$	10 až 100%	10 až 100%	10 až 100%
Δt [půlperiody]	1	1 až 300	1 až 300
Krátkodobá přerušování [s]	žádné	-	≤ 60
Nesymetrie napětí $\Delta U_{neg} / U_{pos}$	2%	2%	3%
Odchylky kmitočtu sítě $\Delta f / f_n$	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$

Kompatibilní úrovně pro harmonické

<i>Rušení</i>	<i>Třída 1</i>	<i>Třída 2</i>	<i>Třída 3</i>
Celkové harmonické zkreslení napětí (THD)	5%	8%	10%

Kompatibilní úrovně pro harmonické složky napětí U_h

<i>Řád harmonické</i>	<i>Třída 1</i>	<i>Třída 2</i>	<i>Třída 3</i>
<i>lichého řádu – mimo násobky 3</i>	[%]	[%]	[%]
5	3	6	8
7	3	5	7
11	3	3,5	5
13	3	3	4,5
17	2	2	4
19	1,5	1,5	4
23	1,5	1,5	3,5
25	1,5	1,5	3,5
>25	0,2+12,5/h	0,2+12,5/h	5x√(11/h)
<i>lichého řádu – násobky 3</i>	[%]	[%]	[%]
3	3	5	6
9	1,5	1,5	2,5
15	0,3	0,3	2
21	0,2	0,2	1,75
>21	0,2	0,2	1
<i>sudého řádu</i>	[%]	[%]	[%]
2	2	2	3
4	1	1	1,5
6	0,5	0,5	1
8	0,5	0,5	1
10	0,5	0,5	1
>10	0,2	0,2	1

Ing. Miloš Molnár



V roce 1977 absolvoval ČVUT FEL obor silnoproudá elektrotechnika. Pracoval jako konstruktér a vývojový pracovník v Elektrotechnických závodech Teplice. Od roku 1993 je jedním z majitelů, jednatelů a pracovníků společnosti EMCOS s.r.o., kde vede oddělení vývoje a konstrukce. Současně se zabývá projektováním moderních kompenzačních prostředků a jejich aplikacím.

Tel. 736633747