Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie

konečný návrh

ČEZ Distribuce, E.ON CZ, E.ON Distribuce, PRE Distribuce, ČEPS, ZSE	**Parametry kvality elektrické energie** **ČÁST 6: OMEZENÍ ZPĚTNÝCH VLIVŮ NA HROMADNÉ DÁLKOVÉ OVLÁDÁNÍ**	**PNE 33 3430-6** 3. vydání

Odsouhlasení normy

Předmluva

Norma se vztahuje na systémy hromadného dálkového ovládání (HDO), které pracují na principu tónového kmitočtu a používají se pro zvýšení průchodnosti sítí. Obsahuje metodiku pro posuzování míry zpětných vlivů na HDO způsobených zařízením zákazníků a současně poskytuje podklady pro zákazníka, výrobce zařízení a projektanty, umožňující realizaci opatření pro minimalizaci těchto vlivů.

Změny oproti předchozímu vydání

- zásadní změnu posuzování v kapitole 3 "Hlavní zásady posuzování", kde se nově stanoví přípustný vliv na zatížení vysílače HDO (připojení výrobny nebo kompenzace do přípojnice, kam se vysílá) a vliv na úroveň signálu HDO (připojení výrobny nebo kompenzace v síti). Změní se i obrázek 1
- Změní se posuzování vlivu v síti nn.
- Doplní se kapitola 10 o přesnější vztahy pro jednotlivé impedance, která definuje způsob výpočtu.
- Zásadně se změní tabulka na str. 18 týkající se připojování bez posouzení - bude přísnější, podle doporučení v A, D a CH.
- Změní se tabulka na str. 18 pro hodnotu snížení o 5 %
- Doplní se posuzování FVE a VTE podle výsledků měření, která děláme.

Nahrazuje PNE 33 3430-6 z 1.1.2005	Účinnost od: 1.1.2011

OBSAH

1. Názvy, definice a označení ... 4
1.1 Názvy a definice ... 4
1.2 Označení ... 5
1.3 Zkratky ... 6
2. Úvod ... 6
2.1 Všeobecně ... 6
2.2 Požadavky na provoz HDO ... 6
2.3 Zátěž při kmitočtu HDO ... 7
3.1 Posuzování vlivu odběrných a kompenzačních zařízení zákazníků na signál HDO ... 10
3.1.1 Zařízení zákazníků se společným napájecím bodem v síti 110 kV ... 10
3.1.2 Zařízení zákazníků se společným napájecím bodem v síti vn ... 12
3.1.3 Zařízení zákazníků se společných napájecím bodem v síti nn ... 17
3.2. Posuzování vlivu zařízení pro výrobu elektrické energie na signál HDO ... 17
3.2.1 Posuzování vlivu výrobních zařízení připojených na síť přes statické měniče ... 19
3.3 Posuzování vlivu výrobních a jiných zařízení zákazníků na zatížení vysílačů HDO ... 24
4. Kompenzační zařízení ... 26
4.1 Přímo připojené kompenzační kondensátory ... 27
4.2 Kompenzační kondensátory s předřadnými tlumivkami ... 27
4.2.1 Kompenzační kondensátory s předřadnými tlumivkami při kmitočtech HDO > 250 Hz ... 30
4.2.2 Kompenzační zařízení s předřadnými tlumivkami při kmitočtech HDO < 250 Hz ... 30
4.3 Jiná zapojení kompenzačních zařízení ... 34
4.3.1 Paralelní zapojení kompenzačních kondensátorů s předřadnými tlumivkami ... 34
4.3.2 Kompenzační zařízení s hradícími členy ... 34
4.3.3 Hrazení kompenzačních baterií bez předřadných tlumivek ... 34
4.3.4. Hrazení kompenzačních baterií s předřadnými tlumivkami ... 35
5. Hradící členy pro tónové kmitočty ... 35
6. Sací obvody ... 36
7. Aktivní filtry a zařízení SVC ... 39
8 Rušivá napětí zařízení zákazníků na kmitočtu HDO ... 39
9. Dodatečné posouzení s ohledem na zpětné vlivy na elektrické sítě ... 40
10. Výpočty úrovní signálu HDO ... 40
11. Symetrizace nesymetrické zátěže ... 42
12. Síťové napáječe s kapacitní filtrací ... 42
13 Kompenzační kondensátory u zářivek a výbojek ... 42

Citované normy a doporučení

[1] PNE 33 3430-0 Výpočetní hodnocení zpětných vlivů zákazníků distribučních soustav

[2] PNE 38 2530 Hromadné dálkové ovládání, automatiky, vysílače a přijímače

[3] ČSN EN 61037 Měření elektrické energie – Ovládání tarifu a zatížení – Zvláštní požadavky pro přijímače hromadného dálkového ovládání – z 1/8.99

STN EN 62054-11 (35 6122) Meranie elektrickej energie (striedavého prúdu). Ovládanie sadzieb a zaťaženia. Časť 11: Osobitné požiadavky na elektronické prijímače HDO

STN EN 62052-21 (35 6134) Zariadenia na meranie elektrickej energie (striedavého prúdu). Všeobecné požiadavky, skúšky a skúšobné podmienky. Časť 21: Zariadenia na ovládanie sadzieb a zaťaženia

[4] ČSN EN 50160ed.2 Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě

STN EN 50160 (33 0121) Charakteristiky napätia elektrickej energie dodávanej z verejnej distribučnej siete

[5] VDE VEÖ, VSE (UCS) Empfehlungen zur Vermeidung unzulässiger Rückwirkungen auf die Tonfrequenz-Rundsteuerung.

[6] VSE (UCS), VEÖ: Empfehlung für die Beurteilung von Netzrückwirkungen

[7] VDEW: Grundsätze für die Beurteilung von Netzrückwirkungen

[8] E-CONTROL: Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen, Teil D: Besondere technische Regeln, Hauptabschnitt D3: Tonfrequenz – Rundsteuerung: Empfehlung zur Vermeidung unzulässiger Rückwirkungen, Version 2.1 2006.

[9] Pracovní skupina DACH: Technische Regeln zur Beurteilung von Netzrückwirkungen, Version 2008

Vypracování normy

Zpracovatel: EGC-EnerGoConsult ČB s.r.o., České Budějovice, Ing. Jaroslav Hanžlík, CSc. Pracovník ONS odvětví energetiky: ÚJV Řež, a.s divize Energoprojekt Praha, Ing. Jaroslav Bárta

1. Názvy, definice a označení

1.1 Názvy a definice

1.1.1 Smluvní výkon

Smluvní výkon je činný výkon, který zákazník nasmlouval s příslušným obchodníkem.

1.1.2 Funkční napětí/funkční úroveň

Nejnižší hodnota řídícího napětí, při němž je za stanovených podmínek ještě zaručena bezvadná funkce přijímačů HDO. Vztáhneme-li tuto hodnotu na jmenovité napětí sítě, získáme funkční úroveň v procentech.

1.1.3 Impedanční činitel

Impedanční činitel α je poměr impedance zařízení zákazníka na kmitočet HDO k jeho impedanci na kmitočet 50 Hz v přípojném bodě.

1.1.4 Impedance zařízení zákazníka

Je výsledná impedance zařízení zákazníka v přípojném bodě. Určuje se jednak pro síťový kmitočet 50 Hz a dále pak pro kmitočet HDO.

1.1.5 Sací obvod (filtrační obvod)

Sériový rezonanční obvod naladěný zpravidla na kmitočet některé harmonické nebo na kmitočet HDO.

1.1.6 Filtrační zařízení

Několik paralelně zapojených sacích obvodů, které jsou naladěny tak, že při kmitočtech určitých harmonických vykazují velmi malé impedance. Filtrační zařízení má na kmitočtu 50 Hz kompenzační účinek .

1.1.7 Hradící člen

Paralelní rezonanční obvod, který je naladěn na kmitočet, který má být hrazen.

1.1.8 Odolnost proti rušení

Schopnost elektrických zařízení odolávat rušivým veličinám určité velikosti bez poruch funkce nebo poškození.

1.1.9 Rušivé napětí

Napětí s kmitočtem rozdílným od kmitočtu sítě superponované na napětí sítě, které může v elektrickém zařízení (zde přijímač HDO) vyvolat nežádoucí ovlivnění.

1.1.10 Řídící napětí tónového kmitočtu

Napětí signálu příslušného kmitočtu HDO superponované na napětí sítě.

1.1.11 Předřadné tlumivky

Tlumivky zapojené do série s jednotlivými stupni kondenzátorové baterie kompenzačního zařízení (chráněná kompenzace).

1.1.12 Reaktanční činitel

Reaktanční činitel **p** je poměr výkonu tlumivky předřazené kondensátoru k výkonu kondenzátoru na síťovém kmitočtu. Reaktanční činitel se obvykle udává v procentech.

1.1.13 Společný napájecí bod

Nejbližší bod sítě pro dané zařízení zákazníka, k němuž jsou nebo mohou být připojena také zařízení dalších zákazníků.

1.1.14 Přípojný bod

Bod sítě, k němuž je nebo má být připojen posuzovaný zákazník.

1.1.15 Meziharmonické

Sinusové kmity jejichž kmitočet není celočíselným násobkem základního kmitočtu 50 Hz.

1.2 Označení

α	impedanční činitel celkového zařízení zákazníka
$\alpha*$	impedanční činitel zařízení zákazníka bez ohledu na zátěž
f_r	rezonanční kmitočet
$f_ř$	řídící kmitočet HDO (kmitočet HDO)
I_k	zapínací proud asynchronního stroje
I_n	jmenovitý proud asynchronního stroje
ν	řád harmonické, případně řád kmitočtu HDO
p	reaktanční činitel předřadné tlumivky
Q_c	výkon kondenzátorové baterie
Q_{cv}	nabíjecí výkon vedení
R_{Tv}	odpor transformátoru na kmitočtu HDO

S_{kQ} třífázový zkratový výkon
S_s zdánlivý výkon generátoru
S_m zdánlivý výkon motoru
P_{sm} smluvní výkon zákazníka
S_{Tr} zdánlivý výkon transformátoru
u_k napětí nakrátko síťového transformátoru
U_{min} minimální úroveň řídícího napětí v síti
U_n jmenovité napětí sítě
u_f funkční úroveň přijímače HDO
U_f funkční napětí přijímače HDO
$U_ř$ řídící napětí tónového kmitočtu
U_v vypočtená úroveň řídícího napětí
ΔU rozdíl mezi skutečnou úrovní a minimální úrovní řídícího napětí
x_d'' rázová reaktance synchronního stroje
x_k rázová reaktance asynchronního stroje (poměr I_n/I_k)
X_{TRv} reaktance transformátoru na kmitočtu HDO
Z_{HDO}^* impedance síťového transformátoru a kompenzačního zařízení na kmitočtu HDO
Z_p impedance zařízení zákazníka na kmitočtu 50 Hz

1.3 Zkratky

PPDS Pravidla provozu distribučních soustav

PDS Provozovatel distribuční soustavy

SVC Static VAR compensation

2. Úvod

2.1 Všeobecně

Hromadné dálkové ovládání HDO využívající tónový kmitočet pracuje na principu superpozice napětí impulsů tónového kmitočtu na napětí sítě. Pomocí těchto impulsů jsou spínána relé přijímačů HDO připojených k síti.

2.2 Požadavky na provoz HDO

Aby systém HDO mohl spolehlivě plnit svou funkci, musí být z hlediska zpětných vlivů splněny zejména následující podmínky:

a) Impulsy tónového kmitočtu musí mít napětí, které dostatečně převyšuje funkční napětí přijímačů PNE 33 3430-0 [1], PNE 38 2530 [2]. Tím je zaručena potřebná bezpečnost proti rušivým napětím. Zařízení zákazníků nesmějí úroveň řídícího napětí nepřípustně

snižovat ani zvyšovat a dále nesmí emitovat do sítě nepřípustně vysoká rušivá napětí v blízkosti kmitočtu HDO (harmonické, meziharmonické).

b) Zařízení zákazníků nesmějí nadměrně zatěžovat vysílače HDO.

2.3 Zátěž při kmitočtu HDO

S ohledem na frekvenční závislost impedancí mají elektrické sítě a zátěže na kmitočtu HDO zcela jiný charakter, než při síťovém kmitočtu. Prakticky beze změny zůstávají pouze čistě ohmické zátěže. Změny hodnot impedancí jsou obzvláště výrazné u motorů, kondensátorů, transformátorů a kabelů. Distribuční sítě sestávají z rozmanitého spojení odporů kapacit a indukčností, které působí komplexně a jako celek jsou silně kmitočtově závislé. V případě rezonancí se výsledná impedance na kmitočtu HDO může značně změnit.

Ustanovení této normy jsou vázána na kmitočty v rozsahu 183,3 – 283,3 Hz, které používají PDS.

3. Posuzování zařízení zákazníků

Nemá-li docházet k nepřípustnému ovlivňování systému HDO zařízeními zákazníků, která jsou připojena k distribuční síti (zejména kompenzační zařízení a motorická zátěž), musí být hodnoceny jejich následující vlivy:

- Změna úrovně signálu
- Zatížení vysílačů
- Emise rušivých napětí.

Při posuzování se bere v úvahu sumární vliv zařízení zákazníka ve společném napájecím bodě, nikoliv vliv jeho jednotlivého zařízení.

Výchozí hodnotou pro posouzení vlivu je změřená úroveň signálu HDO ve společném napájecím bodě bez nově připojovaného zařízení zákazníka. Za tuto úroveň se považuje minimální efektivní hodnota napětí kmitočtu HDO zjištěná během týdenního třífázového měření. Měří se v místě vysílače a ve společném napájecím bodu, kde má být připojena výrobna, kompenzační, nebo odběrné zařízení. Přitom je nutné rovněž brát v úvahu úrovně signálu HDO při nestandardních zapojeních sítí.

Vysílače HDO se dimenzují podle výsledné impedance distribuční sítě na kmitočtu HDO. Tato impedance je složena z impedancí zařízení jednotlivých zákazníků a impedance zařízení distributora elektrické energie.

Velikost zpětných vlivů kompenzačních a odběrných zařízení zákazníků na úroveň signálu HDO závisí na velikosti jejich smluvního výkonu. Platí tedy zásada, že zákazník s vyšším smluvním výkonem může vyšší měrou ovlivňovat signál HDO.

V případech, kdy zákazník nebo výrobce nemůže dodržet předepsané hodnoty, je nutné kontaktovat příslušného PDS.

Zákazníci jsou až na výjimečné případy připojeni třífázově. Zásady pro připojení uvedené v této normě musí být dodrženy ve všech fázích.

Příliš vysoké úrovně signálu HDO mohou způsobovat rušení elektronických zařízení a případně další problémy. **Maximální přípustné hodnoty signálu HDO v sítích vn a nn jsou dány Meisterovou křivkou na obr. 1.** Jsou to průměrné třívteřinové hodnoty [4].

Výpočet impedance zařízení zákazníka na kmitočtu HDO, který je součástí postupu posuzování jeho vlivu na úroveň signálu HDO uvedeného v následujících odstavcích, předpokládá detailní znalost zapojení a způsobu provozu zařízení zákazníka. Pokud je obtížné příslušné údaje získat a je to s ohledem na konkrétní případ účelné, určí se stávající impedance měřením a poté se vypočte impedance v přípojném bodě přičtením impedance nově připojované technologie. Potřebné technické parametry poskytne zákazník.

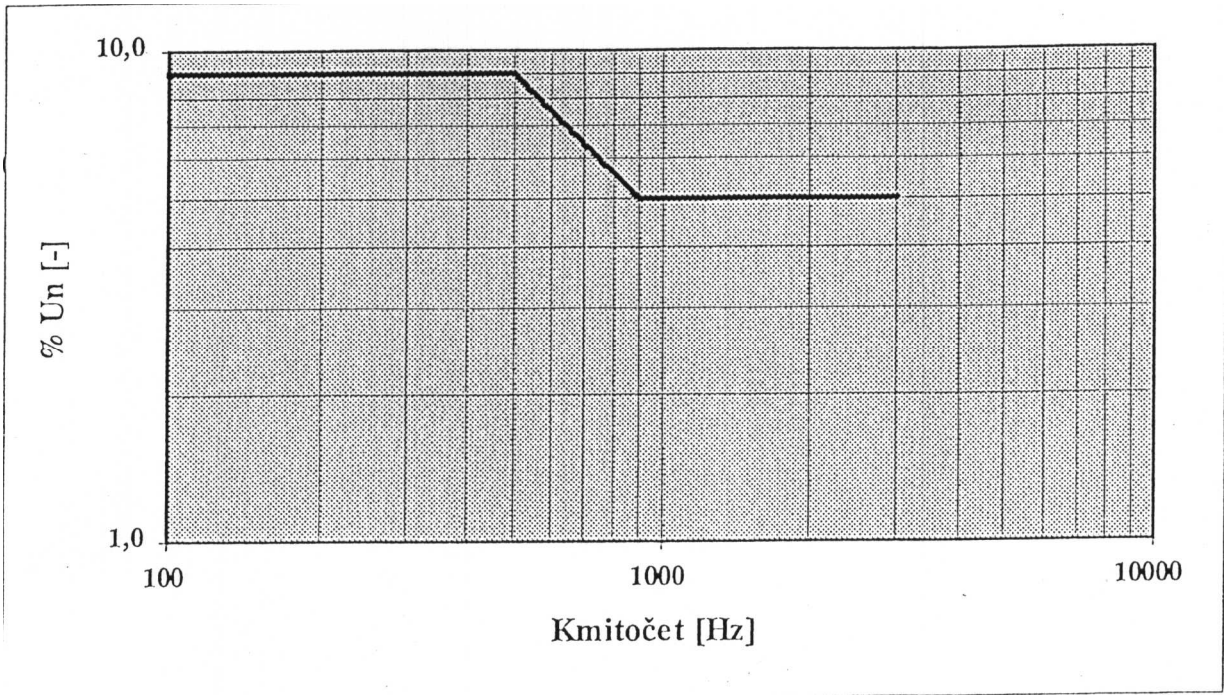
Vzhledem ke značnému množství variant, které mohou vzniknout při posuzování jednotlivých případů a při návrhu opatření, může PDS problémové případy posuzovat individuálně.

Při posuzování se vychází z následujících minimálních úrovní signálu HDO $\mathbf{U_{ř\ min}}$, potřebných pro provoz:

Tabulka 1

Minimální úroveň řídícího napětí $\mathbf{U_{ř\ min}}$ vztažená k **funkčnímu napětí přijímače** U_f=100 %	
Úroveň napětí sítě [kV]	Kmitočet $f_ř$ = 183.3 – 283,3Hz
0,4	150 % U_f
vn	190 % U_f
110	200 % U_f

PDS může požadovat na zákaznících úhradu nákladů vyvolaných investicemi pro omezení zpětných vlivů, nebo úhradu podílu na nich.



Obr. 1 Meisterova křivka průběhu maximálních hodnot signálu HDO v sítích nn a vn

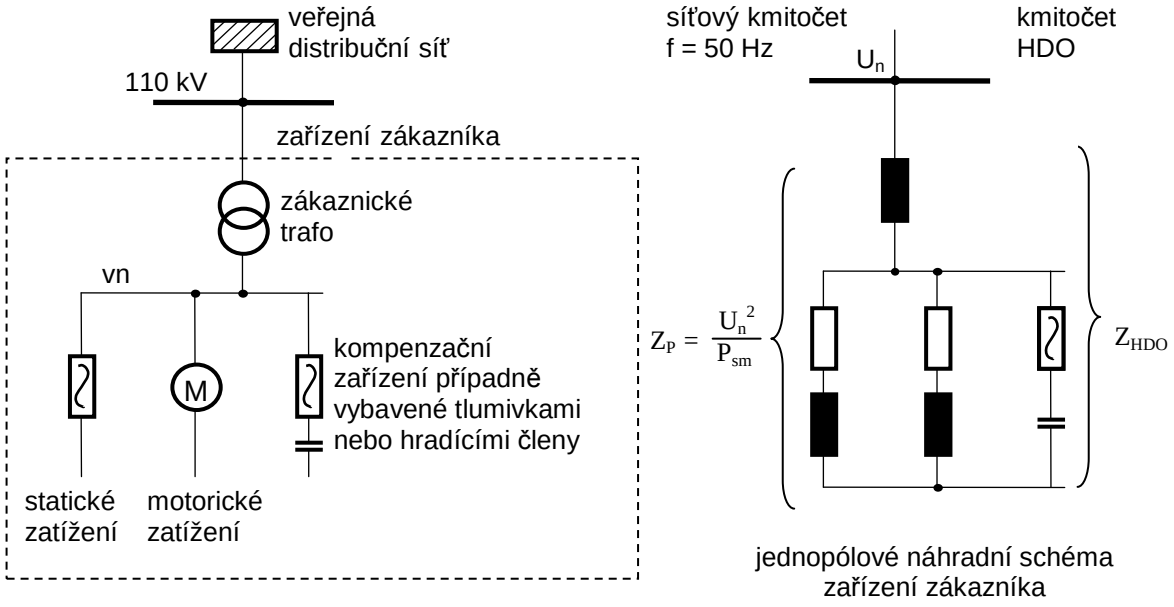
3.1 Posuzování vlivu odběrných a kompenzačních zařízení zákazníků na signál HDO

3.1.1 Zařízení zákazníků se společným napájecím bodem v síti 110 kV

Provozuje-li PDS vysílače HDO do úrovně 110 kV a je-li společný napájecí bod rovněž v této napěťové úrovni, musí být impedance zařízení zákazníka v něm připojená dostatečně vysoká. Jinak dojde k nepřípustnému snížení úrovně signálu HDO.

Zařízení zákazníků v sítích 110 kV jsou zpravidla napájena vlastním transformátorem. V případech, kdy nejsou ze sekundární strany uvedených transformátorů napájeni další zákazníci, což je většina případů, lze v těchto sítích připustit takový pokles signálu HDO, že provoz přijímačů HDO v nich nebude možný. Pokud by např. z důvodů přenosu signálů pro řízení odběru el. energie bylo nutné instalovat přijímač HDO, lze ho připojit na sekundární vinutí napěťových měničů 110 kV.

V případech dostatečné úrovně signálu HDO ve společném napájecím bodě (**obr. 5**) se jeho ovlivnění posuzuje zjednodušeným způsobem. Pro minimální hodnotu impedančního činitele α stanoví PDS minimální impedanci zařízení zákazníka ve společném napájecím bodu. V opačném případě je potřeba výpočet úrovní signálu HDO v síti **(obr. 5)**.



Obr. 2 Zařízení zákazníka se společným napájecím bodem v síti 110 kV

$$\alpha = \frac{Z_{HDO}}{Z_p} = \frac{Z_{HDO}}{U_n^{\,2} / P_{sm}} \qquad [\Omega;\ \text{kV};\ \text{MVA}] \qquad [1]$$

α - impedanční činitel zařízení zákazníka

Z_{HDO} - absolutní hodnota impedance zařízení zákazníka na kmitočtu HDO

Z_p - připojovací impedance zařízení zákazníka na kmitočtu 50 Hz

U_n - jmenovité napětí sítě

P_{sm} - smluvní výkon zákazníka

Minimální přípustná hodnota impedančního činitele je: $\alpha = 1{,}0$

V případech relativně vysoké impedanci mezi přípojným bodem a vysílačem, na níž vzniká úbytek signálu, nebo pokud jsou pro to jiné důvody, může PDS stanovit vyšší hodnotu činitele α.

Pokud je ze sekundární strany transformátoru 110 kV/vn napájeno nejen zařízení zákazníka ale i distribuční sítě ve vlastnictví PDS s přijímači HDO, musí být dodržena nejen hodnota činitele α v síti 110 kV, ale i příslušná minimální úroveň signálu v síti vn.

Příklad:

Zákazník požaduje připojení filtračně kompenzačního zařízení k trakčnímu vedení s napětím 27 kV.

Společný napájecí bod v síti 110 kV je vzdálen 5 km od přípojnice 110 kV do níž se signál vysílá a je současně společným napájecím bodem.

Transformátor 110/27 kV má výkon 12,5 MVA a tento výkon je rovněž výkonem smluvním.

Kmitočet HDO je 216.6 Hz.

Změřená hodnota signálu HDO $U_{ř\,m}$ je 1,8% Un, náběhové napětí přijímačů 0,78 % In.

Podle tabulky 1 určíme minimální přípustnou hodnotu signálu HDO $U_{ř\,min}$:

$U_{ř\,\min} = 0{,}78 \cdot 2 = 1{,}56\ \%\, Un$

Vzhledem k tomu, že $U_{řm} > U_{ř\,min}$ (obr.5) a signál HDO má dostatečnou reservu, může PDS upustit od výpočtu vlivu kompenzačního zařízení na signál HDO a stanoví impedanci Z_{HDO} ve společném napájecím bodu:

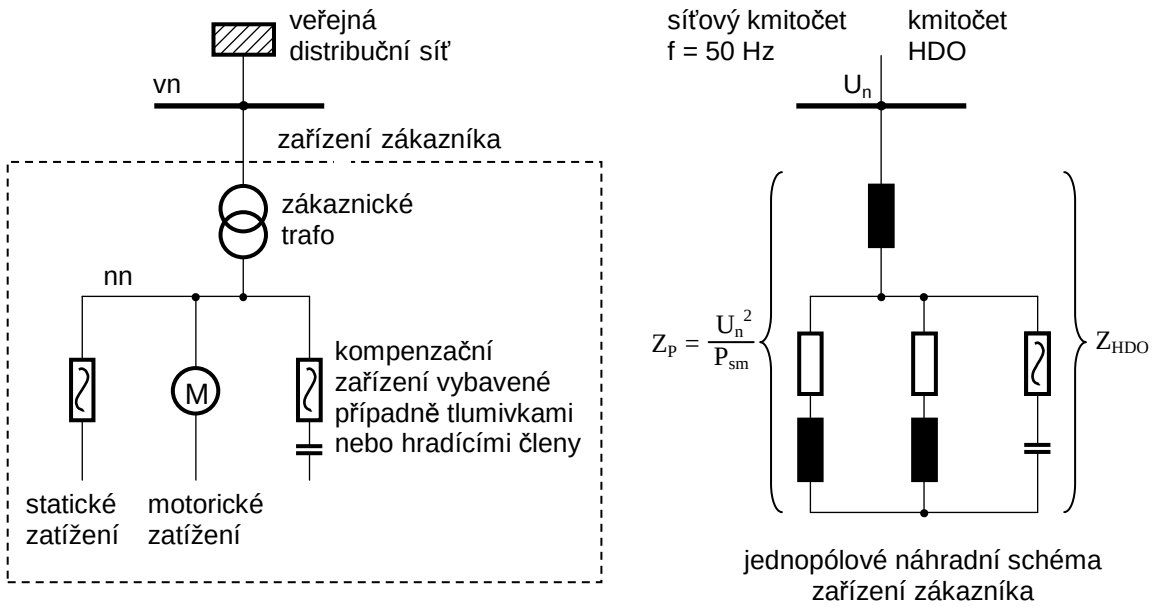
$$Z_{HDO} = \frac{\alpha \,.\, U_n^{\,2}}{S_{sm}} = 1{,}0 \,.\, \frac{110^2}{12{,}5} = 968\ \Omega \qquad [2]$$

Tato hodnota bude jedním z podkladů pro návrh filtračně kompenzačního zařízení.

Po jeho uvedení do provozu se zadaná hodnota impedance ověří měřením.

3.1.2 Zařízení zákazníků se společným napájecím bodem v síti vn

Zařízení zákazníků v sítích jsou zpravidla napájena vlastním transformátorem. Nejsou-li ze sekundární strany uvedených transformátorů napájeni další zákazníci , což je většina případů, lze v těchto sítích připustit takový pokles signálu HDO, že provoz přijímačů HDO v nich nebude možný. Pokud by např. z důvodů přenosu signálů pro řízení odběru el. energie bylo nutné instalovat přijímač HDO, lze ho připojit na sekundární vinutí napěťových měničů vn.



Obr. 3 Zařízení zákazníka se společným napájecím bodem v síti vn

V případech dostatečné úrovně signálu HDO ve společném napájecím bodě (**obr. 5**) se jeho ovlivnění posuzuje zjednodušeným způsobem. Pro minimální hodnotu impedančního činitele α stanoví PDS minimální impedanci zařízení zákazníka ve společném napájecím bodu. V opačném případě je potřeba výpočet úrovní signálu HDO v síti **(obr. 5)**.

$$\alpha = \frac{Z_{HDO}}{Z_p} = \frac{Z_{HDO}}{U_n^2 / P_{sm}} \qquad [\Omega; \text{kV; MVA}] \qquad [3]$$

α - impedanční činitel zařízení zákazníka

Z_{HDO} - absolutní hodnota impedance zařízení zákazníka na kmitočtu HDO

Z_p - připojovací impedance zařízení zákazníka na kmitočtu 50 Hz

U_n - jmenovité napětí sítě

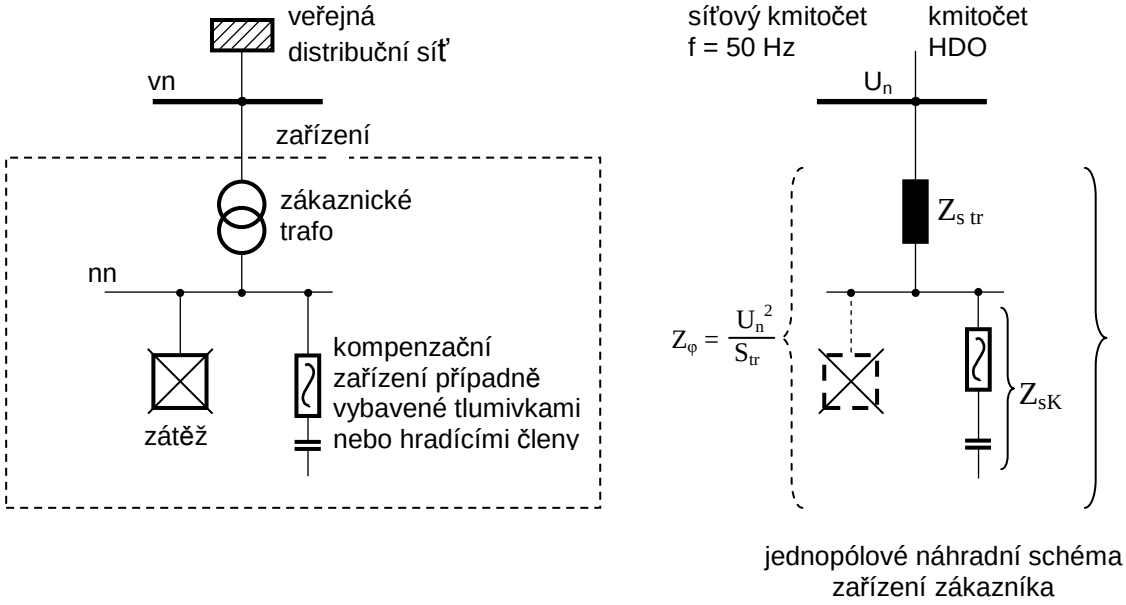
P_{sm} - smluvní výkon zákazníka

Minimální přípustná hodnota impedančního činitele α je: $\alpha_{min} = 0,4$

V případech relativně vysoké impedanci mezi přípojným bodem a vysílačem, na níž vzniká úbytek signálu, nebo pokud jsou pro to jiné důvody, může PDS stanovit vyšší hodnotu činitele α.

Impedanční činitel α* u kompenzačních zařízení

Snížení úrovně signálu HDO je často způsobeno zařízeními pro kompenzaci účiníku. Pro posouzení jejich vlivu postačí ve většině případů zjednodušený výpočet. Při něm se respektuje pouze transformátor zákazníka a kompenzační zařízení.



Obr. 4 Zařízení zákazníka se společným napájecím bodem v síti vn, zjednodušené schéma

Ovlivnění signálu HDO v síti se pak posuzuje podle činitele α*

$$\alpha^* = \frac{Z^*_{HDO}}{U_n^2 / S_{Tr}} \qquad [\Omega; \text{kV}; \text{MVA}] \qquad [4]$$

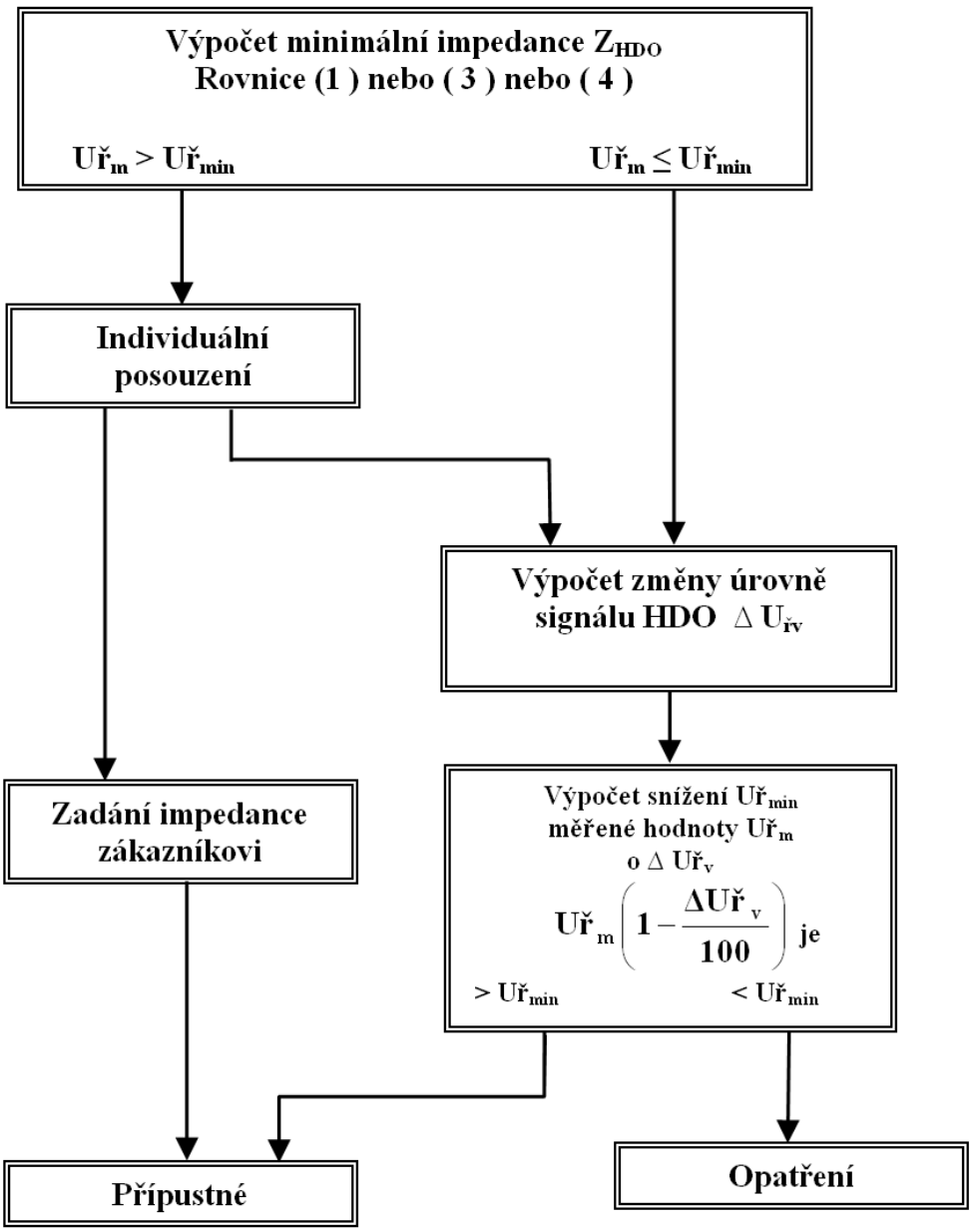
Z_{HDO} - absolutní hodnota impedance transformátoru a kompenzačního zařízení zákazníka na kmitočtu HDO

U_n - jmenovité napětí sítě

S_{Tr} - zdánlivý výkon transformátoru zákazníka

Minimální přípustná hodnota impedančního činitele je $\alpha^*_{min} = 0{,}5$

V případech uvedených v předchozím, může PDS stanovit vyšší hodnotu činitele α*.



$Uř_m$ - měřená úrovně signálu HDO (minimum týdenního měření)

$Uř_v$ - vypočtená úroveň signálu HDO s připojenou technologií nebo výrobou

$Uř_{min}$ - minimální přípustná úroveň signálu HDO (tab. 1)

$\Delta Uř_v$ - snížení úrovně signálu HDO v % vlivem zařízení zákazníka

Obr. 5 Posouzení vlivu odběrného nebo kompenzačního zařízení na úroveň signálu HDO v sítích vvn a vn.

Impedanční činitel $\alpha*$ umožňuje pouze přibližné posouzení zpětných vlivů na zařízení HDO vzhledem k tomu, že nejsou respektovány impedance zátěže. Zejména u zákazníků:

- s transformačním výkonem využitým pouze z malé části,
- napájených z více transformátorů,
- s vysokým podílem točivých strojů a při nízkých kmitočtech HDO (< 250 Hz),
- vlastní výrobou el. energie,

je nutný přesný výpočet poměrů podle **obr.5.**

Jak plyne z předchozího, určuje činitel α ($\alpha*$) minimální přípustnou hodnotu impedance zařízení zákazníka na kmitočtu HDO.

Příklad 1

K síti nn zákazníka je připojena kondenzátorová baterie pro kompenzaci účiníku s předřadnými tlumivkami (chráněná kompenzace). Impedance ostatního zařízení zákazníka připojeného k síti nn není známa, zákazník nemá zařízení pro výrobu elektrické energie.

Společný napájecí bod je v síti 22 kV. Jsou splněny podmínky pro výpočet s činitelem $\alpha*$.

Naměřená hodnota signálu HDO $U_{řm}$	1,7 % Un.
Náběhové napětí přijímače	1,8V, tj. 0,78 % Un.
Kmitočet HDO	216,6 Hz
Maximální výkon kompenzační baterie	400 kVAr
Výkon transformátoru 22/0,4 kV	1000 kVA
Napětí nakrátko	6 %

Podle tabulky 1 určíme minimální přípustnou hodnotu signálu HDO:

$$U_{\check{r}\min} = 0{,}78 \cdot 1{,}9 = 1{,}48\,\% U_n$$

Vzhledem k tomu, že $U_{řm} > U_{ř\ min}$ (obr.3) a signál HDO má dostatečnou reservu, můžeme upustit od výpočtu vlivu kompenzačního zařízení na signál HDO a stanovíme impedanci Z^*_{HDO}:

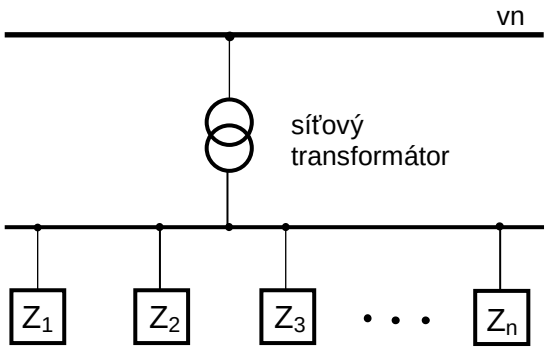
$$Z^*_{HDO} = \frac{\alpha^* \cdot U^2}{S_{Tr}} = \frac{0{,}5 \cdot 22^2}{1} = 242\ \Omega$$

PDS předepíše zákazníkovi uvedenou impedanci. Na frekvenci HDO bude mít induktivní charakter. Její dodržení se ověří měřením po uvedení zařízení do provozu.

Pravděpodobně bude nutné zvýšit hodnotu činitele **p**.

3.1.3 Zařízení zákazníků se společných napájecím bodem v síti nn

V sítích nn je ze společného transformátoru napájen větší počet zákazníků u nichž jsou zpravidla namontovány přijímače HDO. Jejich řádná funkce je podmíněna dostatečnou úrovní signálu HDO, která nesmí být nepřípustně snížena ani zvýšena zařízeními zákazníků.



Z - zařízení zákazníka

Obr. 6 Zařízení zákazníků se společným napájecím bodem v síti nn

Při posuzování se vychází ze změřené úrovně signálu HDO a zjednodušeným výpočtem se na základě náhradního schématu sestaveného s využitím vztahů v kapitole 10 určí jeho snížení, případně se k tomuto účelu použije program pro výpočet šíření signálu HDO.

Pokud je i po připojení posuzované technologie zaručena minimální přípustná úroveň signálu HDO je připojení přípustné.

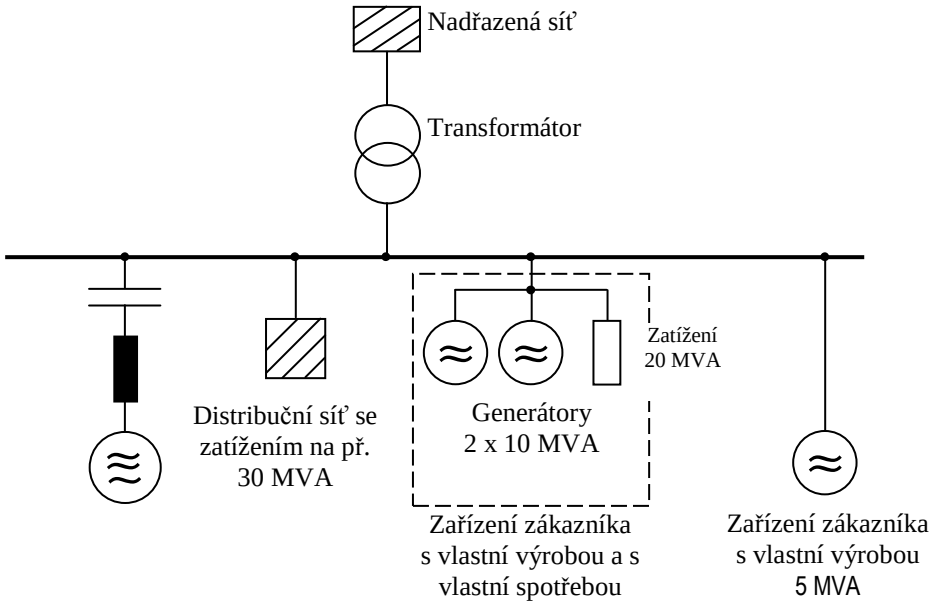
Výrobní zařízení se posuzují podle následující kapitoly 3.2

3.2. Posuzování vlivu zařízení pro výrobu elektrické energie na signál HDO

Vysílače HDO jsou dimenzovány na zatížení, které odpovídá síti do níž se signál HDO vysílá. Zařízení pro výrobu el. energie, jejichž primární energií je teplo voda, vítr, či slunce, mohou způsobovat v závislosti na své fyzikální podstatě následující zpětné vlivy na zařízení HDO:

- vyšší zatížení vysílačů HDO, a to jednak svou impedancí, a jednak impedancí zařízení dalších zákazníků, které je možné k síti připojit v důsledku zvýšené kapacity zdrojů

- snížení signálu HDO v přípojném bodě
- emise rušivých kmitočtů do sítí (výrobní zařízení připojená k síti pomocí statických měničů)



Obr 7 Příklad přídavného zatížení vysílače HDO vyvolaného generátory zákazníků

Vysílač HDO podle příkladu na **obr. 6** musí dimenzován aby dodal potřebný proud pro:

- Zatížení 30MVA distribuční sítě
- Zatížení 20MVA zařízení zákazníka
- Generátory 2 x 10MVA a 5 MVA zákazníků
- Transformátor včetně nadřazené sítě.

Přímo připojené rotační el. stroje, t.j. motory a generátory představují pro kmitočet HDO induktivní zatížení (viz kapitola 10).

Tato induktivní reaktance způsobuje, v případě jejich připojení do přípojnice do níž se signál HDO vysílá, zvýšení zatížení vysílačů, které závisí na jejich výkonu a projevuje se zejména u nízkých kmitočtů HDO.

Při připojení generátorů větších výkonů (vztaženo k výkonu transformátoru napájecího danou síť) k síti, dochází k poklesu úrovně signálu HDO, který závisí na impedanci generátoru a podélné impedanci přípojného bodu sítě vůči vysílači HDO.

Problémové jsou z tohoto hlediska generátory 6 kV nebo 10 kV připojené k síti bez blokového transformátoru.
Pro posouzení vlivu výrobního zařízení nelze použít činitele α podle kapitoly 3 vzhledem k nízkým impedancím zdrojů.

Výrobní zařízení připojovaná do sítí nn, vn a 110 kV smí způsobit snížení úrovně signálu HDO maximálně o 5% jeho změřené hodnoty za předpokladu, že bude dodržena minimální přípustná úrovně signálu HDO podle tab. 1. Tato úroveň musí být u sítí vn a vvn zaručena i při mimořádných zapojeních sítí.

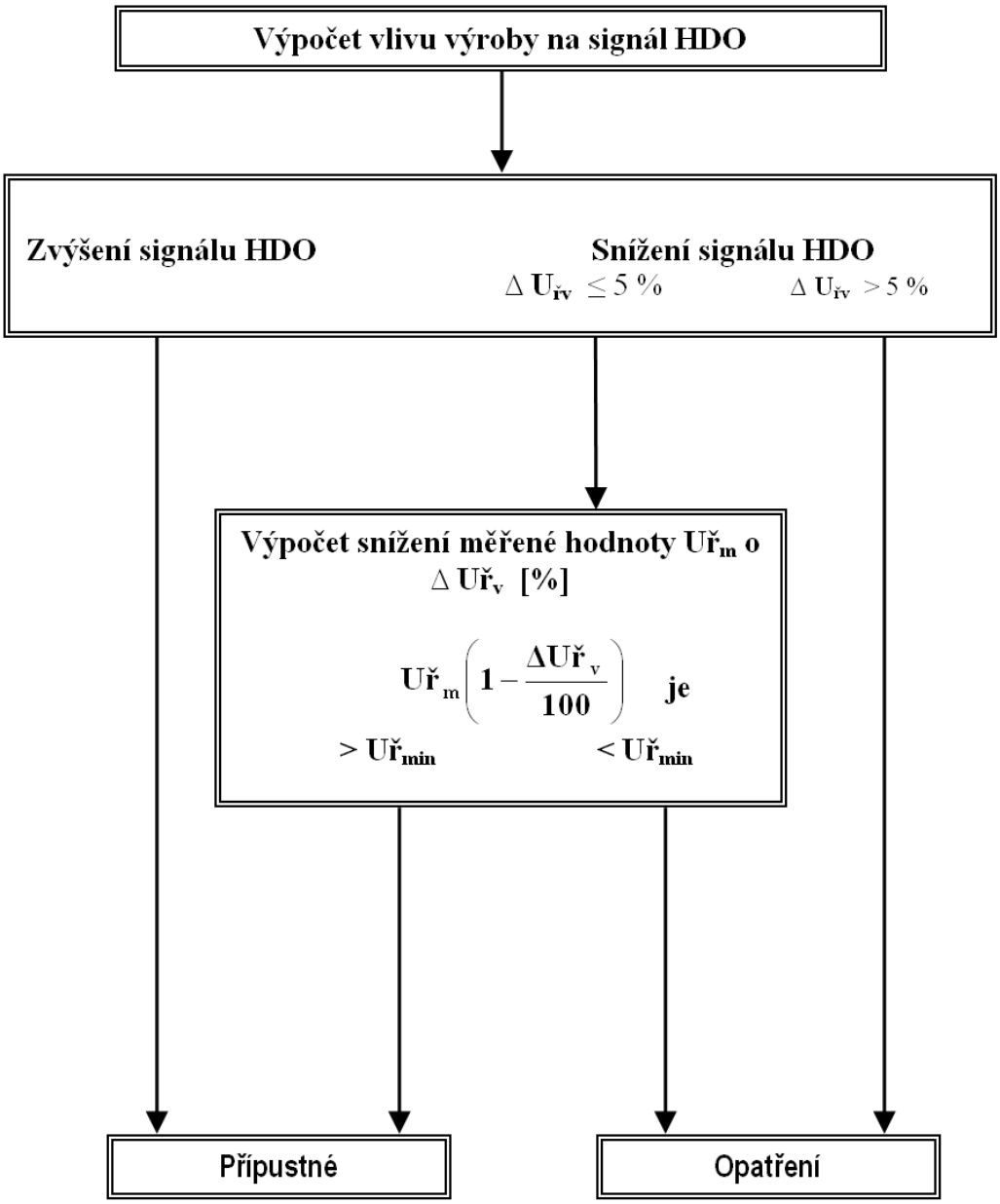
Bez posouzení je možné připojit k síti generátory nepřesáhne-li jejich výkon v přípojném bodě a výkon v celé síťové oblasti následující hodnoty:

Úroveň napětí sítě [kV]	**Celkový výkon výrobních zařízení**	
	V přípojném bodu	**V síťové oblasti**
0,4	5 kVA FVE 20 kVA	10 kVA FVE 40 kVA
vn	0,5 MVA	1 MVA
110	5 MVA	10 MVA

3.2.1 Posuzování vlivu výrobních zařízení připojených na síť přes statické měniče

Tato zařízení pokud neobsahují filtry harmonických nezpůsobují zpravidla nepřípustné zpětné vlivy na HDO. Z hlediska HDO nejsou žádná výkonová omezení pro připojení těchto zařízení k síti. Musí být ovšem dodrženy přípustné mezní hodnoty rušivých napětí v oblasti kmitočtu HDO stanovená v kapitole 8.

POZNÁMKA: I když není připojení takovýchto zařízení z hlediska HDO kritické, měl by být k němu dán souhlas příslušného PDS, neboť minimálně dojde ke snížení impedance sítě vlivem odběrů, které jsou z těchto zdrojů napájeny. Statické měniče s filtračními obvody harmonických by ovšem měly být posuzovány v každém případě.



$Uř_m$ - měření úrovně signálu HDO (minimum týdenního měření)

$Uř_v$ - vypočtená úroveň signálu HDO s připojenou technologií nebo výrobou

$Uř_{min}$ - minimální přípustná úroveň signálu HDO (tab. 1)

$\Delta Uř_v$ - snížení úrovně signálu HDO v % vlivem výroby

Obr. 8 Posouzení vlivu výroby na úroveň signálu HDO v sítích nn, vn a vvn.

Příklad 1

K síti 110 kV má být připojena výrobna s dvěma generátory. Společný napájecí bod v síti 110 kV je spojen jednoduchým vedením 110 kV délky 20 km s přípojnicí 110 kV transformovny 400/110 kV do níž se vysílá signál HDO. Naměřená hodnota signálu HDO ve společném napájecím bodu $U_{ř\,min}$= 1,8% Un, náběhové napětí přijímačů 0,78% Un.

Zdánlivý výkon jednoho generátoru:	70 MVA
Napětí generátoru:	10,5 kV
Rázová reaktance generátoru x_d":	0,15
Výkon transformátoru 110 / 10,5 kV:	70 MVA
Napětí nakrátko:	8%
Délka vedení110 kV:	20 km
Frekvence HDO:	216,6 Hz
Úroveň signálu na přípojnici 110 kV U_s:	2% Un

Posouzení:

Minimální úroveň signálu HDO (tabulka 1):

$$U_{ř\,\min} = 0{,}78 \cdot 2{,}0 = 1{,}56\ \%\, U_n$$

Podle diagramu na **obr.8** vypočteme snížení úrovně signálu HDO vlivem výrobny. K tomu použijeme vhodný program, případně je,vzhledem k jednoduchosti daného příkladu, možný následující přibližný výpočet podle kapitoly 10 (X_{Lv} = 0,4 Ω/km; R_v = 0,347 Ω/km) :

Impedance vedení: $$X_v = \frac{216{,}6}{50} \cdot 0{,}4 \cdot 20 = j\ 34{,}7\ \Omega$$

$$R_v = 0{,}347 \cdot 20 = 6{,}9\ \Omega$$

$$Z_v = \sqrt{6{,}9^2 + 34{,}7^2} = 35{,}4\ \Omega$$

Impedance generátoru: $$X_G = \frac{216{,}6}{50} \cdot 0{,}15 \cdot \frac{110^2}{70} = j\ 112{,}3\ \Omega$$

$$R_G = 0{,}1 \cdot X_G = 11{,}2\ \Omega$$

Impedance transformátoru: $$X_T = \frac{216{,}6}{50} \cdot 0{,}08 \cdot \frac{110^2}{70} = j\ 59{,}9\ \Omega$$

$$R_T = 0{,}1 \cdot X_T = 5{,}99\ \Omega$$

Výsledná impedance ve společném napájecím bodu:

$$X_{\Sigma} = \frac{1}{2}\left(112{,}3 + 59{,}9\right) = j\ 86{,}1\ \Omega$$

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{2}\left(11{,}2, + 5{,}99\right) = 8{,}6\ \Omega$$

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{8{,}6^2 + 86{,}1^2} = 86{,}53\ \Omega$$

Výsledná úroveň vysílaného signálu ve společném napájecím bodu:

$$U_{\check{r}v} = U_S \cdot \frac{86{,}53}{86{,}53 + 35{,}4} = 2 \cdot 0{,}71 = 1{,}42\%\ U_n$$

Snížení úrovně signálu (2% U_n) vlivem výrobny: $\Delta U_{\check{r}v} = 29\%$

Protože snížení úrovně signálu je větší než 5 % předepíše provozovatel sítě opatření - zde hradící členy na generátorové napětí, nebo jeden hradící člen 110 kV.

Vypočteme ještě přírůstek zatížení vysílače ΔI_{vvn} podle **obr. 9.**
Vysílaná úroveň signálu 2 % U_n na přípojnici odpovídá napětí 1270 V. Výsledná impedance výrobny a vedení na přípojnici 110 kV bude:

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{15{,}5^2 + 120{,}8^2} = 121{,}8\ \Omega$$

$$\Delta I_{vvn} = \frac{1270\ V}{121{,}8\ \Omega} = 10{,}4\ A$$

V případě, že vysílač je v blízkosti svého maximálního zatížení, je tato hodnota nepřípustná. Hrazení výrobny zmenší i přídavné zatížení vysílače na přípustnou míru.

Příklad 2:

Uvažujme shodnou výrobnu a všechna další technická data shodná s **příkladem 1.** Pouze délka vedení bude 1,7 km.

Impedance vedení: $X_v = \frac{216,6}{50} \cdot 0,4 \cdot 1,7 = j\ 2,95\ \Omega$

$R_v = 0,347 \cdot 1,7 = 0,59\ \Omega$

$Z_v = \sqrt{0,59^2 + 2,95^2} = 3,0\ \Omega$

Impedance generátoru: $X_G = \frac{216,6}{50} \cdot 0,15 \cdot \frac{110^2}{70} = j\ 112,3\ \Omega$

$R_G = 0,1 \cdot X_G = 11,2\ \Omega$

Impedance transformátoru: $X_T = \frac{216,6}{50} \cdot 0,08 \cdot \frac{110^2}{70} = j\ 59,9\ \Omega$

$R_T = 0,1 \cdot X_T = 5,99\ \Omega$

Výsledná impedance ve společném napájecím bodu:

$X_\Sigma = \frac{1}{2}(112,3 + 59,9) = j\ 86,1\ \Omega$

$R_\Sigma = \frac{1}{2}(11,2, + 5,99) = 8,6\ \Omega$

$Z_\Sigma = \sqrt{8,6^2 + 86,1^2} = 86,53\ \Omega$

Výsledná úroveň signálu ve společném napájecím bodu:

$$U_T = U_S \cdot \frac{86,53}{86,53 + 3,0} = 2 \cdot 0,97 = 1,93\ \%\ U_n$$

Snížení úrovně signálu vlivem výrobny: $\Delta U_{řv}$ = 3,5 % je tedy menší než 5 %.

Podle **obr. 8** vypočteme snížení naměřeného signálu HDO vlivem výrobny:

$$\Delta U_{řv} = U_{řm}\left(1 - \frac{U_{řv}}{100}\right) = 1,8\left(1 - \frac{1,93}{100}\right) = 1,76\% U_n$$

Tato hodnota je vyšší než minimální přípustná úroveň signálu HDO 1,56 % U_n, připojení je z tohoto hlediska přípustné.

Vypočteme ještě přírůstek zatížení vysílače ΔI_{vvn} podle **obr. 9.**
Vysílaná úroveň signálu 2 % U_n na přípojnici odpovídá napětí 1270 V. Výsledná impedance na přípojnici 110 kV bude:

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{9{,}19^2 + 89{,}1^2} = 89{,}6\ \Omega$$

$$\Delta I_{vvn} = \frac{1270\ V}{89{,}6\ \Omega} = 14{,}17\ A$$

V případě, že vysílač je v blízkosti svého maximálního zatížení, je tato hodnota nepřípustná. Pokud tomu tak není rozhodne PDS na základě dalšího rozvoje dané oblasti 110 kV, zda toto přídavné zatížení bude tolerovat, nebo zda bude požadovat hrazení výrobny.

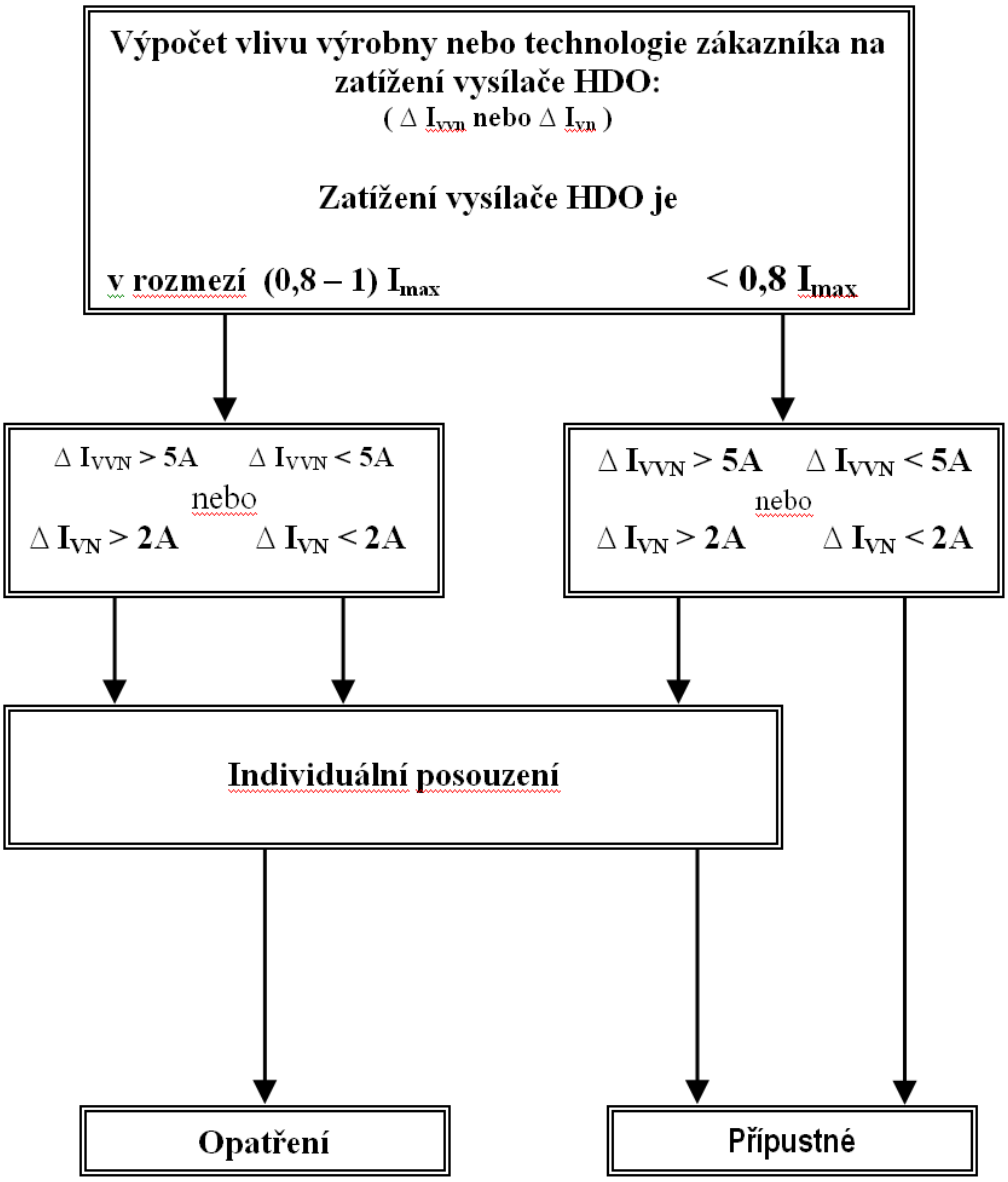
3.3 Posuzování vlivu výrobních a jiných zařízení zákazníků na zatížení vysílačů HDO

Výrobní zařízení připojovaná k přípojnicím vn nebo vvn do nichž se vysílá signál HDO, nebo v jejich bezprostřední blízkosti se posuzují rovněž z hlediska jejich vlivu na zatížení vysílače. Vychází se z informace o velikosti zatížení vysílače, kterou poskytne PDS.

Pokud je zatížení vysílače blízké maximu (>0,8 I_{max}) , je připojení bez opatření nepřípustné.

Pokud tomu tak není, je přípustné následující zvýšení zatížení vysílače:

- **ΔI_{vvn} nemá překročit 5A u vysílače HDO do úrovně 110 kV**
- **ΔI_{vvn} nemá překročit 2A u vysílače HDO do úrovně vn.**



I max - maximální zatížení vysílače [A]

Δ Ivvn - přírůstek zatížení vysílače do 110 kV vlivem výroby, případně technologie zákazníka

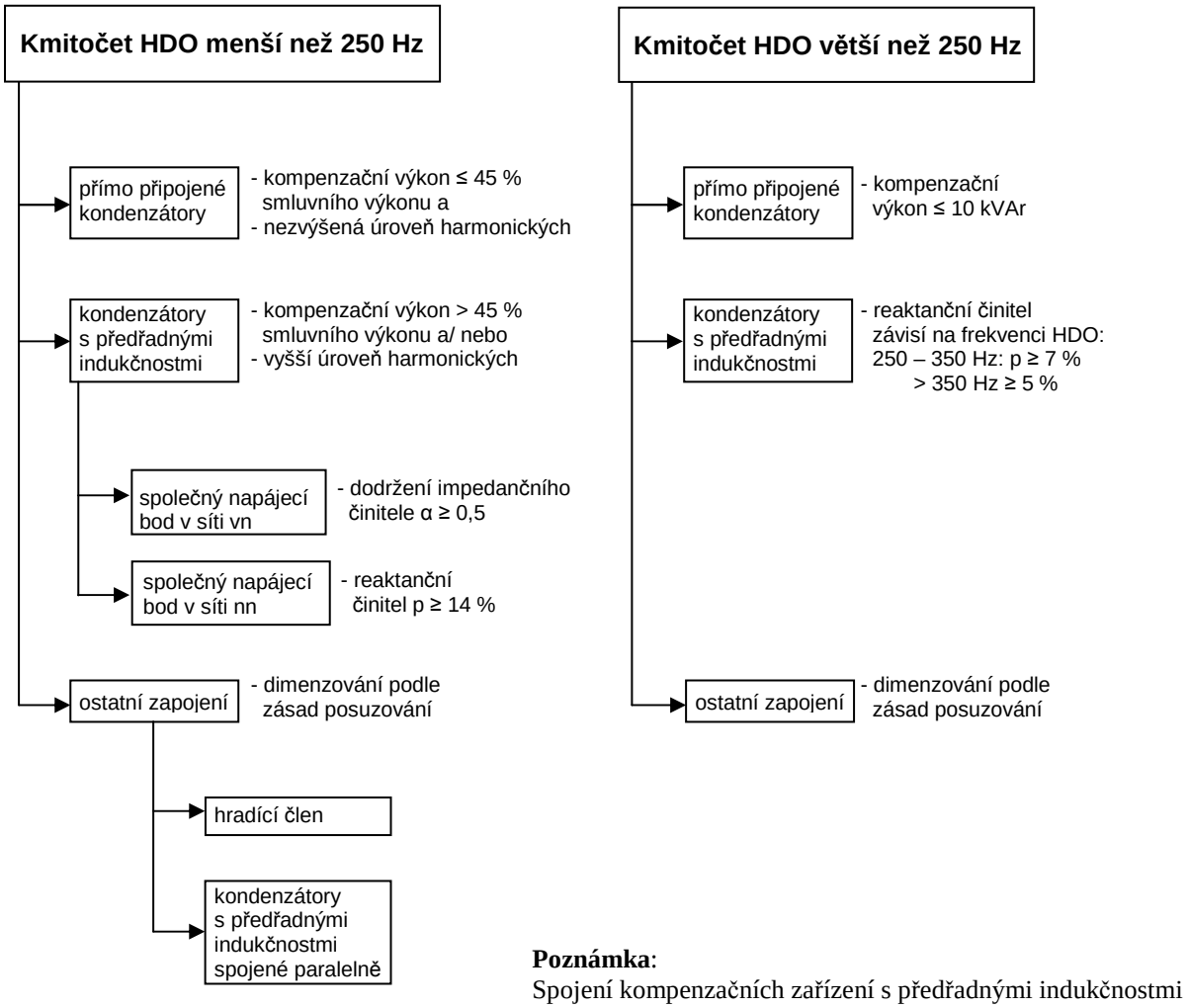
Δ Ivn - přírůstek zatížení vysílače do vn vlivem výroby, případně technologie zákazníka

Obr. 9 Posouzení vlivu výrobny nebo technologie zákazníka na zatížení vysílače HDO

4. Kompenzační zařízení

Kompenzací jalového výkonu v blízkosti odběrů lze odlehčit elektrické sítě vzhledem k tomu, že jalový výkon není dodáván sítí, nýbrž kondensátory. Je potřeba ovšem dbát na to, aby nedocházelo k překompenzování, které vede k technickým problémům a zpravidla i k ekonomickým nevýhodám. V úvahu je potřeba brát přídavné zatížení kondensátorů harmonickými a zpětné vlivy na systém HDO.

Přehled o úpravách kompenzačních zařízení z hlediska zpětných vlivů na HDO dává **obr. 10** a podrobnosti jsou v následujícím textu. Pro posuzování účinnosti těchto úprav platí pravidla kapitoly 3.



Poznámka:
Spojení kompenzačních zařízení s předřadnými indukčnostmi a s hradícími členy může vést k nechtěným rezonancím v oblasti síťových harmonických

Obr. 10

4.1 Přímo připojené kompenzační kondensátory

U kmitočtů < 250 Hz a kompenzačním výkonu ≤ 45 % smluvního výkonu je přímé připojení kompenzačních kondensátorů z hlediska HDO přípustné.

U kmitočtů > 250 Hz je nutné předřadit kondensátorům tlumivky. Pouze kompenzační baterie s výkonem ≤ 10 kVAr u jednoho zákazníka smí být k síti připojeny přímo.

POZNÁMKY:

- Omezení kompenzačního výkonu na 45 % smluvního výkonu může být rozšířeno na 45 % výkonu transformátoru. Předpokladem proto je, že na transformátor nejsou připojena žádná další kompenzační zařízení.
- Viděno z napájecí sítě tvoří rozptylová indukčnost transformátoru s kapacitou kompenzačních kondensátorů sériový rezonanční obvod. Rezonanční kmitočet tohoto obvodu klesá se stoupajícím kompenzačním výkonem. Při spínání jednotlivých stupňů kondenzátorové baterie vzniká více rezonančních kmitočtů.

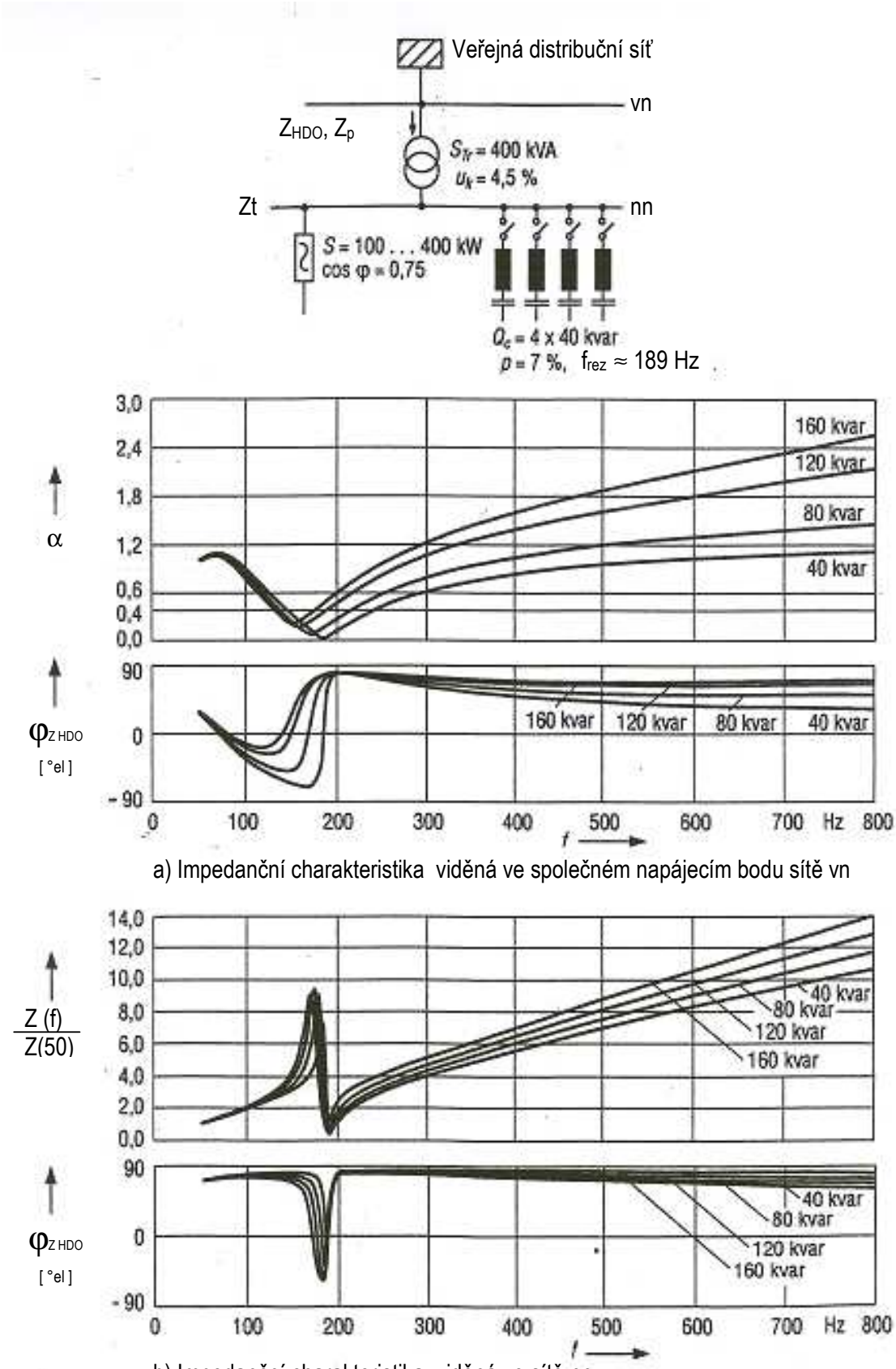
V blízkosti rezonančního kmitočtu je impedance sériového rezonančního obvodu nízká a může způsobit snížení úrovně signálu HDO. Při dostatečně velkém odstupu tohoto rezonančního kmitočtu od kmitočtu HDO je impedance zařízení zákazníka na frekvenci HDO dostatečně vysoká a k ovlivnění signálu HDO nedojde.

Při realizaci je nutné provést rozbor impedancí jak z hlediska distribuční sítě, tak i z hlediska zařízení zákazníka, neboť může docházet vlivem vyšší úrovně harmonických k přetěžování kondensátorů.

4.2 Kompenzační kondensátory s předřadnými tlumivkami

Předřazení tlumivek kompenzačním kondensátorům je nutné při:

- kmitočtu HDO vyšším než 250 Hz
- vysoké úrovni harmonických
- kmitočtu HDO nižším než 250 Hz a kompenzačním výkonu větším než 45 % smluvního výkonu.



a) Impedanční charakteristika viděná ve společném napájecím bodu sítě vn

b) Impedanční charakteristika viděná ze sítě nn

Obr. 11 Impedanční charakteristiky kondenzátorové baterie s předřadnými tlumivkami

Zvýšenou úroveň harmonických lze předpokládat v případech, kdy výkon zdroje harmonických je větší než 20 % instalovaného výkonu zákazníka.

Předřadné tlumivky jsou zapojeny do série s kondensátory. Tím získá rezonanční obvod transformátor - tlumivka - kondensátor definovaný rezonanční kmitočet, který zpravidla leží pod kmitočtem páté harmonické (250 Hz), která v sítích převládá. Z hlediska HDO je nutné dbát na to, aby uvedený rezonanční obvod měl v přípojném bodě dostatečně vysokou impedanci pro kmitočet HDO určenou impedančním činitelem α (α*).

Kompenzační baterie s reaktančním činitelem předřadné tlumivky **p** % má rezonanční kmitočet:

$$f_r = \frac{50}{\sqrt{\frac{p}{100}}} \quad [Hz, \%] \qquad [17]$$

Příklad pro p = 5 %:

$$f_r = \frac{50}{\sqrt{0{,}05}} = 223{,}61\ Hz \qquad [18]$$

Rezonanční kmitočet viděný ze sítě vyššího napětí je nižší vlivem reaktance transformátoru. Na **obr. 11** jsou průběhy impedancí kompenzačního zařízení viděné ze sítě vn a nn pro p = 7%. Z nich lze zjistit, že nepřijatelně nízké hodnoty činitele α a tím i impedance sítě ve společném napájecím bodu v síti vn jsou pro u nás používané frekvence 183.3 a 194 Hz. Rovněž na frekvenci 216.6 Hz není hodnota α pro všechny stupně kondenzátorové baterie vyhovující. Nejjednodušším řešením je zvýšení hodnoty činitele **p**.

Vzhledem k tomu, že se vlivem předřadné tlumivky zvýší napětí na kondensátoru přibližně o **p** %, není zpravidla možné předřadit tlumivky stávajícím kondenzátorovým bateriím.

Aby byla dodržena minimální hodnota impedančního činitele α (α∗), t.j. minimální přípustná hodnota impedance na kmitočtu HDO, je nutné správně volit hodnotu činitele **p**.

4.2.1 Kompenzační kondensátory s předřadnými tlumivkami při kmitočtech HDO > 250 Hz

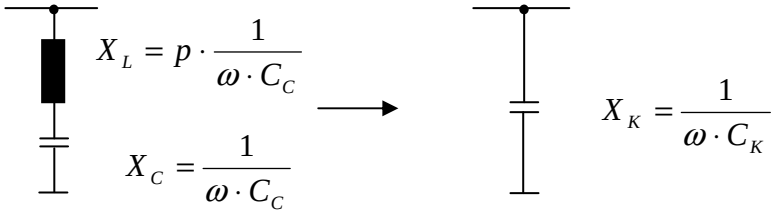
Při kmitočtech HDO 283,3 Hz je obvykle potřeba volit předřadné tlumivky s p ≥ 7 %.

4.2.2 Kompenzační zařízení s předřadnými tlumivkami při kmitočtech HDO < 250 Hz

Při kmitočtech HDO < 250 Hz je nutný diferencovaný přístup. Kromě dalšího je potřeba respektovat druh zatížení zákazníka, stupeň kompenzace, parametry transformátoru, kmitočet HDO a vliv harmonických na kompenzační kondensátory.

V této kapitole jsou odvozeny rovnice pro reaktanční činitel **p** tak, aby bylo splněno zjednodušené kritérium kapitoly 3.1.2 $\alpha^* \geq 0{,}5$. Přitom jsou zanedbány ohmické odpory a počítá se pouze s reaktancemi.

U kompenzačních zařízení s předřadnými tlumivkami není instalovaný výkon kondenzátorové baterie roven kompenzačnímu výkonu Q_c na přípojnici.



Pro kompenzační výkon pak platí:

$$Q_K = \frac{U_n^2}{X_K} = \frac{U_n^2 \cdot \omega C_C}{1 - p} \qquad [19]$$

X_L – reaktance předřadné tlumivky

X_C – reaktance kondenzátorové baterie

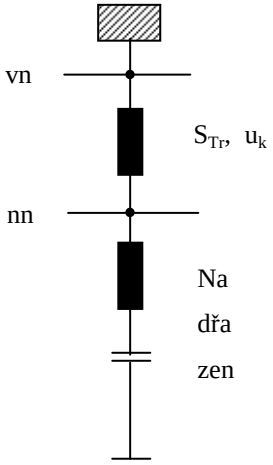
X_k – reaktance kondenzátorové baterie určená z kompenzačního výkonu

C_K – kapacita kondenzátorové baterie určená z kompenzačního výkonu

C_C – kapacita kondenzátorové baterie určená z instalovaného výkonu

Napětí na kondenzátorové baterii je:

$$U_C = \frac{1}{1-p} \cdot U_n \qquad [20]$$



Reaktance prvků obvodu	
50 Hz	Kmitočet HDO
$X_{Tr} = \frac{u_k \cdot U_n^2}{S_{Tr}}$	$\nu = \frac{f_{ř}}{50\ Hz}$
$X_L = \frac{U_n^2 \cdot p}{Q_K\ (1-p)}$	$X_{sTr} = \frac{\nu \cdot u_k \cdot U_n^2}{S_{Tr}}$
$X_C = \frac{U_n^2}{Q_K\ (1-p)}$	$X_{sL} = \frac{U_n^2 \cdot p \cdot \nu}{Q_K\ (1-p)}$
	$X_{sC} = \frac{U_n^2}{Q_K\ (1-p) \cdot \nu}$

X_{sTr} = reaktance transformátoru zákazníka na kmitočtu HDO
X_{sL} = reaktance předřadné tlumivky na kmitočtu HDO
X_{sC} = reaktance kondenzátorové baterie na kmitočtu HDO
$f_{ř}$ = kmitočet HDO

V návaznosti na kapitolu 3.2 můžeme určit hodnotu reaktančního činitele **p** tak, aby byla dodržena hodnota impedančního činitele α následovně:

Pro impedanci zařízení zákazníka ve společném napájecím bodě platí

$$Z_s^* = X_s = \nu \cdot u_k \cdot \frac{U_n^2}{S_{Tr}} + \frac{U_n^2 \cdot p \cdot \nu}{Q_K\ (1-p)} - \frac{U_n^2}{Q_K\ (1-p) \cdot \nu} \qquad [21]$$

$$\alpha^* = \frac{Z_s^*}{\frac{U_n^2}{S_{Tr}}} = u_k \cdot \nu + \frac{S_{Tr}}{Q_K\ (1-p)} \cdot (p \cdot \nu - \frac{1}{\nu}) \qquad [22]$$

Pro reaktanční koeficient **p** pak platí:

$$p \geq \frac{\frac{1}{\nu^2} + \frac{Q_K}{S_{Tr}} \cdot (\frac{\alpha^*}{\nu} - u_k)}{1 + \frac{Q_K}{S_{Tr}} \cdot (\frac{\alpha^*}{\nu} - u_k)} \quad [23]$$

dosadíme-li $k = \frac{Q_k}{S_{Tr}}$ a $\alpha^* = 0{,}5$, dostaneme:

$$p \geq \frac{\frac{1}{\nu^2} + k\,(\frac{1}{2\nu} - u_k)}{1 + k\,(\frac{1}{2\nu} - u_k)} \quad [24]$$

Tato rovnice platí pro případ, že rezonanční frekvence obvodu $f = \frac{50\ Hz}{\sqrt{p}}$ leží **pod** frekvencí HDO.
Dodatečně vysoké hodnoty činitele α* lze dosáhnout i při frekvenci obvodu ležící **nad** frekvencí HDO. V tomto případě platí:

$$\alpha^* = \frac{S_{Tr}}{Q_K\,(1-p)}\quad (\frac{1}{n} - p \cdot \nu) - u_k \cdot \nu \quad [25]$$

Dosadíme-li $k = \frac{Q_K}{S_{Tr}}$ a $\alpha^* = 0{,}5$, dostaneme:

$$p \leq \frac{\frac{1}{\nu^2} - k\,(\frac{1}{2\nu} + u_k)}{1 - k\,(\frac{1}{2\nu} + u_k)} \quad [26]$$

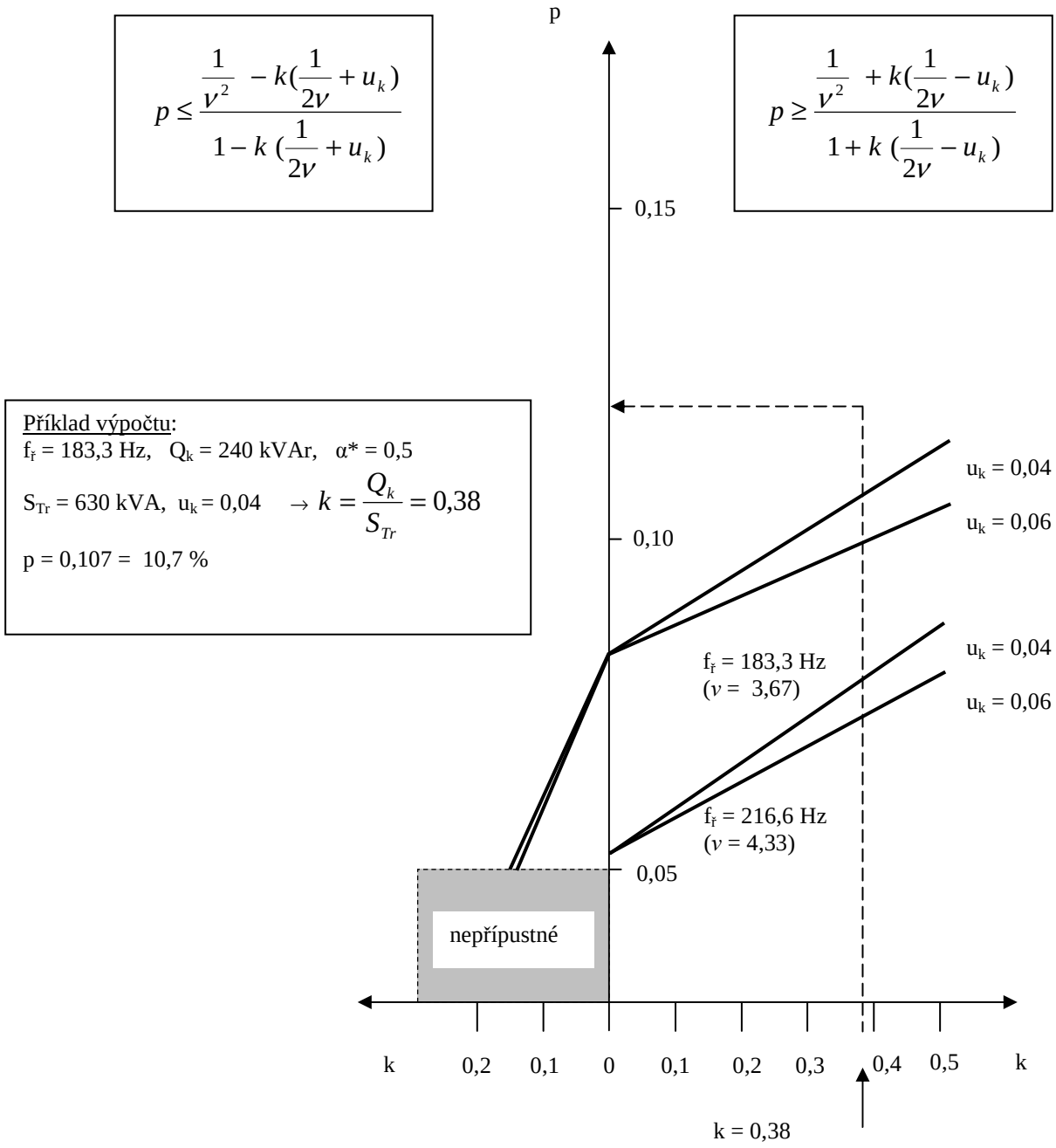
Pro kmitočty HDO 216,6 Hz a 183,3 Hz je zpracován graf na **obr. 12**.
Podmínky, kdy lze použít činitele α*, vyplývají z kapitoly 3.2.

Výsledný kmitočet leží nad kmitočtem HDO

$$p \le \frac{\frac{1}{\nu^2} - k(\frac{1}{2\nu} + u_k)}{1 - k\,(\frac{1}{2\nu} + u_k)}$$

Výsledný kmitočet leží pod kmitočtem HDO

$$p \ge \frac{\frac{1}{\nu^2} + k(\frac{1}{2\nu} - u_k)}{1 + k\,(\frac{1}{2\nu} - u_k)}$$



Příklad výpočtu:
$f_ř$ = 183,3 Hz, Q_k = 240 kVAr, α* = 0,5

S_{Tr} = 630 kVA, u_k = 0,04 $\rightarrow k = \frac{Q_k}{S_{Tr}} = 0{,}38$

p = 0,107 = 10,7 %

Obr. 12

4.3 Jiná zapojení kompenzačních zařízení

Při realizaci zapojení podle odstavců 4.3.1 a 4.3.2 je nutné dodržet kritéria posuzování podle kapitoly 3.

Tato zapojení mohou vést k dalším rezonančním kmitočtům. Proto je nutné pečlivé dimenzování a naladění.

4.3.1 Paralelní zapojení kompenzačních kondensátorů s předřadnými tlumivkami

Kompenzační zařízení mohou být realizována tak, že kondensátory každého společně zapínaného stupně kondenzátorové baterie, jsou rozděleny na dvě sekce a těmto sekcím jsou předřazeny tlumivky tak, aby vznikly různé rezonanční kmitočty. Dva paralelně řazené sériové rezonanční obvody vytvářejí tak paralelní rezonanční obvod. Rezonanční kmitočet sekcí leží přitom nad a pod kmitočtem HDO. U kmitočtů HDO ≤ 194 Hz může být pomocí tohoto zapojení dosaženo vysoké impedance pro kmitočet HDO a dobrého sacího účinku pro 5. harmonickou při přijatelných nákladech.

4.3.2 Kompenzační zařízení s hradícími členy

Kompenzační zařízení s předřadnými tlumivkami nebo bez nich mohou být pro zmenšení zpětných vlivů na HDO opatřena hradícími členy. Přitom musí být dodržena kritéria z kapitoly 3.1.2.

Mohou být použity hradící členy u jednotlivých stupňů kondenzátorové baterie nebo jeden hradící člen pro celou baterii.

4.3.3 Hrazení kompenzačních baterií bez předřadných tlumivek

Je-li regulovaná kondenzátorová baterie zahrazena jedním společným hradícím členem vzniknou v závislosti na zapnutém stupni kondenzátorové baterie různé rezonanční kmitočty. Tyto kmitočty by neměly ležet v oblasti výrazných síťových harmonických.
Tento problém lze do značné míry odstranit hrazením jednotlivých stupňů kondenzátorové baterie.

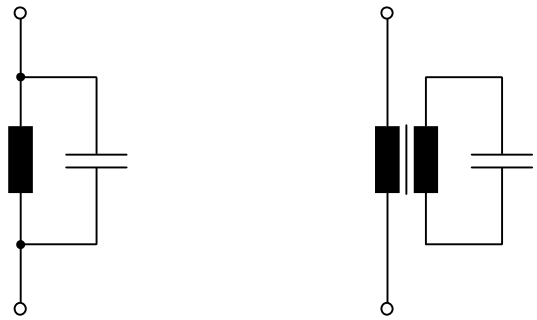
4.3.4. Hrazení kompenzačních baterií s předřadnými tlumivkami

Je-li kompenzační zařízení s předřadnými tlumivkami ještě jako celek zahrazeno, vzniknou komplikované kmitočtové průběhy impedancí. Požadovaný hradící účinek nemusí být vždy dosažen. Rovněž mohou vzniknout nežádoucí rezonance na kmitočtech výrazných síťových harmonických. Výhodnější v těchto případech je hrazení jednotlivých stupňů kondenzátorové baterie.

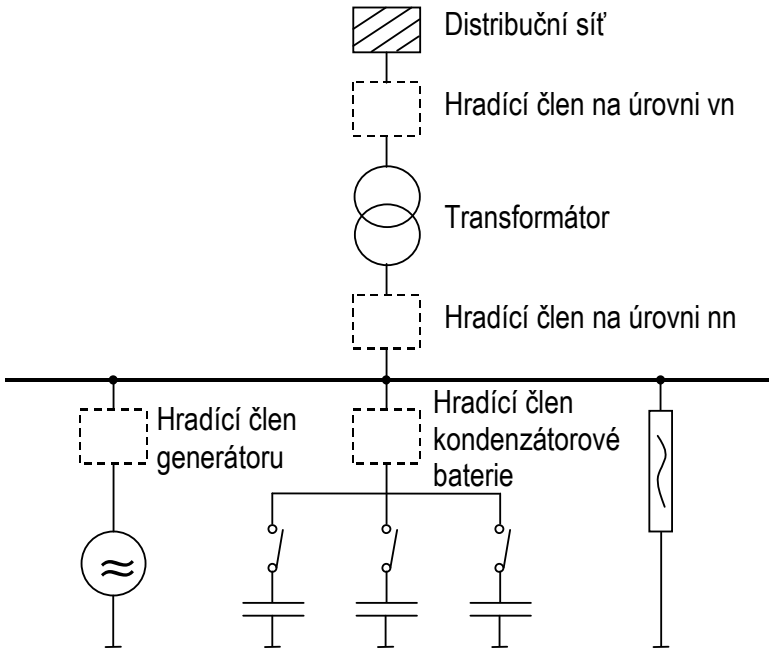
5. Hradící členy pro tónové kmitočty

Hradící členy jsou, jak plyne z **obr. 13** paralelní rezonanční obvody naladěné na frekvenci HDO. Na této frekvenci mají ohmický odpor, jehož velikost závisí hlavně na činiteli jakosti tlumivky, t.j na jejích ztrátách, čímž je jeho hodnota směrem nahoru omezena. Velikost tohoto odporu je pak mírou hradícího účinku a volí se podle impedančních poměrů v konkrétní síti. Z to plyne, že ne ve všech případech lze technicky a ekonomicky přijatelným řešením dosáhnout požadovaného hradícího účinku. Tak například je neekonomické hrazení jednoho vedení vn nebo 110 kV. Na síťové frekvenci se hradící člen chová jako induktivní reaktance a její velikost se volí tak, aby úbytek napětí 50 Hz nepřesáhl hodnotu dohodnutou s provozovatelem sítě.

Na **obr.14** jsou uvedeny hlavní aplikace hradících členů. Z hlediska nákladů je zpravidla nejvýhodnější instalovat hradící členy na co nejnižší napěťové úrovni. U generátorů o výkonech vyšších než 100 MVA obvykle není ekonomické instalovat hradící členy na úrovni generátorového napětí s ohledem na vysoké proudy.
Další podrobnosti o použití a dimenzování hradících členů jsou uvedeny v PNE 38 25 30 [2].



Obr.13 Provedení hradících členů



Obr. 14 Hlavní aplikace hradících členů

6. Sací obvody

Sací obvody se používají ke snižování úrovní harmonických, meziharmonických a signálu HDO v síti. Ve většině případů sestávají z několika paralelně zapojených sériových rezonančních obvodů

Kromě filtračního účinku se zpravidla využívají i pro kompenzaci účiníku.

Minimální sací účinek:

Poměr impedance sacího obvodu Z_s ke zkratové impedanci sítě Z_k má být [9]:

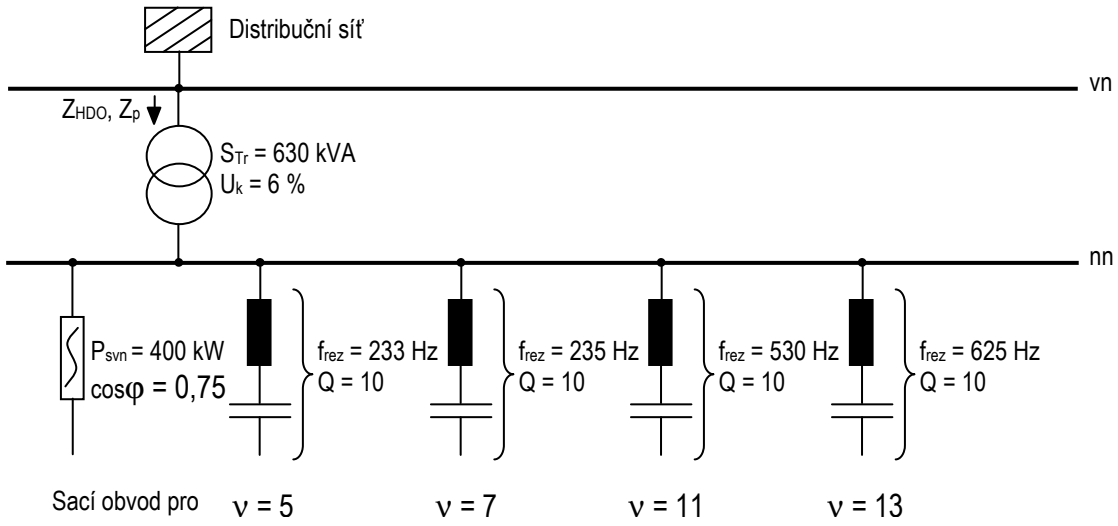
$$\frac{Z_s}{Z_k} \leq 0{,}5$$

Obě impedance jsou vztaženy na příslušnou tónovou frekvenci.

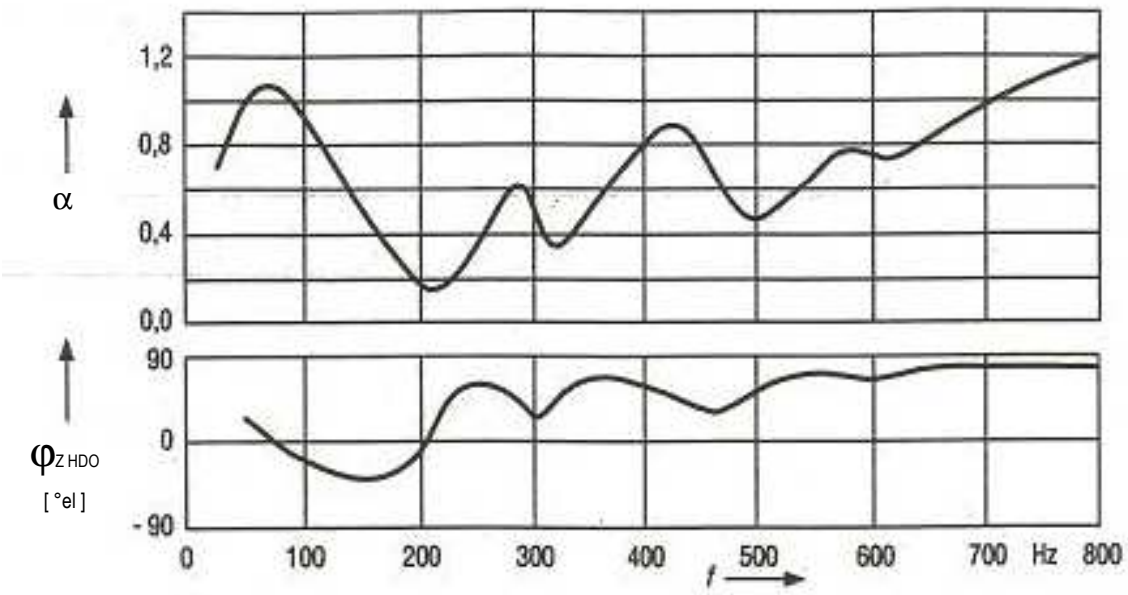
Sací obvody jsou často součástí automatických filtračně-kompenzačních zařízení. Jednotlivé obvody se zpravidla ladí na frekvence poněkud nižší, než jsou frekvence příslušných harmonických sítě. Jejich impedance jsou pak na těchto frekvencích mírně induktivní a tím se zamezí vzniku paralelních rezonancí, při nichž dochází k přehřívání tlumivek.

Sací obvody s filtry páté harmonické jsou obvyklou příčinou snížené úrovně signálu HDO s frekvencí 216,6 Hz v síti PDS.

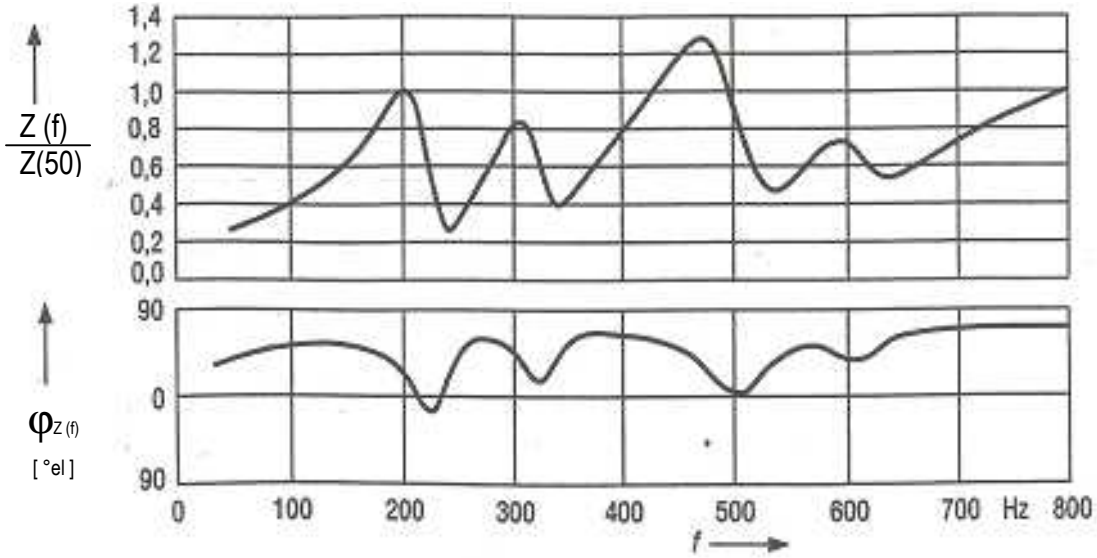
Z hlediska minimalizace zpětných vlivů na HDO je nutné dodržet ustanovení bodu 3.2.1. Induktivní reaktance transformátoru napájejícího danou síť snižuje frekvence sacích obvodů v přípojném bodě. Tím může dojít k snížení impedančního činitele α ($\alpha*$) na kmitočtech v okolí 200 Hz pod přípustnou hodnotu, jak je znázorněno na **obr. 16.**



Obr. 15 Příklad filtračně kompenzačního zařízení



a) Impedanční charakteristika viděná ve společném napájeném bodu sítě vn



b) Impedanční charakteristika viděná ze sítě nn

Obr. 16 Impedanční charakteristiky sacích obvodů

V těchto případech je potřeba použít vhodně navrženého hradícího členu. Přelaďování filtru páté harmonické se ne vždy setká s úspěchem, může dojít ke vzniku paralelní rezonance na páté harmonické a k přehřívání tlumivek.

7. Aktivní filtry a zařízení SVC

Kromě sacích obvodů se pro snižování úrovní harmonických a meziharmonických kmitočtů používá v poslední době aktivních filtrů. V protikladu k pasivním elementům, t.j. tlumivkám a kondensátorům, z nichž sestávají sací obvody, analyzují aktivní filtry plynule proud zátěže, který má být kompenzován a emitují do sítě odpovídající korekční proud v protifázi k příslušným složkám proudu zátěže. Tím lze dosáhnout i u nelineárních zátěží téměř sinusového proudu.

Pokud aktivní filtr emituje korekční proudy, jejichž kmitočet má dostatečný odstup od kmitočtu HDO, nedochází ke zpětným vlivům.

Jakmile však kmitočet emitovaných korekčních proudů leží na kmitočtu HDO nebo v jeho blízkosti, může dojít k ovlivnění přijímačů HDO.

Aktivní filtry nesmí emitovat korekční proudy na kmitočtu HDO nebo v jeho těsné blízkosti, které by vyvolaly rušivá napětí vyšší než je uvedeno v kapitole 8.

8 Rušivá napětí zařízení zákazníků na kmitočtu HDO

Zařízení zákazníků připojená přes střídače, jako například pohony s řízením počtu otáček ap., nebo obloukové pece na tavení oceli, mohou produkovat rušivá napětí na kmitočtu HDO nebo na kmitočtu ležícím v jeho blízkosti. Příslušné proudy tečou v přípojném bodě do distribuční sítě a mohou způsobit chybnou funkci přijímačů HDO.

Rušivé napětí na kmitočtu HDO, způsobené zařízením zákazníka nebo ležící v bezprostřední blízkosti tohoto kmitočtu, nesmí překročit hodnotu 0,1 % U_n.

K chybné funkci přijímačů HDO mohou v důsledku modulačních efektů vést rovněž rušivá napětí s odstupem ± 100 Hz od použitého kmitočtu HDO.

Rušivá napětí s odstupem ± 100 Hz od kmitočtu HDO způsobená zařízením zákazníka, nebo ležící v bezprostřední blízkosti těchto kmitočtů, nesmí být vyšší než 0,3 % U_n.

Pokud tato rušivá napětí jsou v dané oblasti vyvolána zařízeními více zákazníků, musí být uvažováno s jejich výsledným sumačním účinkem.

9. Dodatečné posouzení s ohledem na zpětné vlivy na elektrické sítě

Při návrhu a připojování zařízení zákazníků musí být kromě zpětných vlivů na HDO dbáno požadavků týkajících se zpětných vlivů na elektrické sítě. Ty jsou uvedeny v PNE 33 3430-0 [1].

Z hlediska možného ovlivnění přijímačů HDO jsou důležité zejména úrovně harmonických a meziharmonických kmitočtů.

Rušivé emise proudů harmonických a meziharmonických do distribučních sítí musí být omezeny i z důvodu možného ovlivnění prahu citlivosti přijímačů HDO, který se relativně snižuje kromě dalšího též vlivem jejich sumárního účinku. Přípustné úrovně jsou uvedeny v PNE 33 3430-0 [1] a úrovně pro zkoušky přijímačů jsou v ČSN EN 61037 [3].

Zcela zanedbat nelze ani zpětný vliv harmonických a meziharmonických na měniče kmitočtu vysílačů HDO. Velikost těchto vlivů závisí na druhu a provedení vazby vysílače, problémy mohou vzniknout u sériových vazeb vzhledem k tomu, že v daném bodě sítě je úroveň proudových harmonických, které působí na sériovou vazbu, vždy vyšší než úroveň napěťových harmonických, které působí na vazbu paralelní.

10. Výpočty úrovní signálu HDO

Výpočty šíření signálu v sítích 110 kV a vn se realizují na počítači na základě náhradního schématu. Programy, které jsou k tomuto účelu nabízeny, zpravidla dostatečně přesně simulují jednotlivé komponenty sítě. V jednodušších případech (paprskové sítě ap.) a při nízkých kmitočtech HDO (f < 300 Hz) postačí respektovat impedance jednotlivých prvků sítě následovně:

Impedance nadřazené sítě:

$$X_{kQ\nu} = \nu \frac{U_n^{\,2}}{S_{kQ}} \qquad [\Omega, kV, MVA] \qquad [6]$$

$$R_{kQ\nu} = 0{,}1 \;.\; X_{kQ\nu}, \qquad \nu = \frac{f_{HDO}}{50} \qquad [7]$$

Impedance transformátorů:

$$X_{Tr\nu} = \nu \;.\; \frac{u_k \;.\; U_n^{\,2}}{100 \;.\; S_{Tr}} \qquad [\Omega, \%, kV, MVA] \qquad [8]$$

$$R_{Trv} = 0{,}05 \div 0{,}1\, X_{Trv} \qquad [9]$$

Impedance generátorů:

$$X_{Sv} = \nu \,.\, \frac{x_d''}{100} \cdot \frac{U_n^{\,2}}{S_s} \qquad [\Omega,\ \%,\ kV,\ MVA] \qquad [10]$$

$$R_{Sv} = 0{,}1 \quad X_{Sv} \qquad [11]$$

Impedance motorů:

$$X_m = \nu \,.\, \frac{x_k}{100} \cdot K_{SV} \cdot \frac{U_n^{\,2}}{S_m} \qquad [\Omega;\ \%;\ kV;\ MVA] \qquad [12]$$

K_{SV} = 1 pro 50 Hz, pro kmitočty 183 – 283 Hz je K_{SV} = 0,65 ÷ 0,85

Impedance vedení:

Podélná impedance:

$$X_{vv} = \nu \ . \ x \ . \ 1 \qquad [\Omega, \Omega / km, \quad km] \qquad [13]$$

$$R_w = R_{v50} \qquad [14]$$

Příčná reaktance:

$$X_{cv} = \frac{1}{\nu} \ . \ \frac{U_n^{\,2}}{Q_{cv}} \ . \ l \qquad [\Omega,\ kV,\ MVAr / km,\ km] \qquad [15]$$

Reaktance kondenzátorové baterie:

$$X_c = \frac{1}{\nu} \ . \ \frac{U_n^{\,2}}{Q_c} \qquad [\Omega,\ kV,\ MVAr] \qquad [16]$$

U_n jmenovité napětí sítě

u_k napětí nakrátko

x_d“ rázová reaktance synchronního stroje

x_k rázová reaktance asynchronního stroje (poměr I_n/I_k)

I_n jmenovitý proud asynchronního stroje

I_k zapínací proud asynchronního stroje

S_{Tr} zdánlivý výkon transformátoru

S_s zdánlivý výkon generátoru

S_m zdánlivý výkon motoru

Q_{cv} nabíjecí výkon vedení na 1 km délky

Q_c výkon kondenzátorové baterie

Určování impedancí zátěží na tónových kmitočtech vyžaduje znalost jejich členění na zátěže ohmické, motorické a kapacitní. Tyto informace většinou nejsou pro danou síť k dispozici, proto se hodnoty zadávají na základě zkušeností získaných měřením.

11. Symetrizace nesymetrické zátěže

Při použití symetrizačních zapojení, např. zapojení Steinmetzova, se mohou v jednom nebo ve dvou fázových vodičích vyskytnout rezonance na kmitočtu HDO, které vedou k nepřípustnému ovlivňování signálu. Steinmetzova zapojení se používá na příklad u indukčních pecí které pracují s kmitočtem 50 Hz a připojují se přes pecní transformátor mezi dvě fáze sítě vn.

Je nutné dbát na to, aby zásady pro posuzování podle kapitoly 3 byly dodržovány ve všech fázových vodičích a ve všech provozních stavech.

12. Síťové napáječe s kapacitní filtrací

Síťové napáječe s kapacitní filtrací jsou v současné době používány v mnoha elektronických přístrojích. jako např. v osobních počítačích, televizorech a úsporných osvětlovacích tělesech. Zařízení vybavená těmito napáječi odebírají elektrickou energii ze sítě pouze během velmi krátké doby, přibližně uprostřed každé půlperiody sinusovky síťového napětí. V této době se nabíjí kondensátor, diody usměrňovače jsou vodivé a filtrační kondensátory všech zařízení jsou připojeny k síti. Při větším počtu těchto přístrojů a u vyšších kmitočtů HDO může během uvedené doby docházet k poklesům signálu HDO.

13 Kompenzační kondensátory u zářivek a výbojek

Zářivky a výbojky potřebují k svému provozu předřadná zapojení sloužící k předehřátí elektrod, vytvoření zapalovacího napětí a omezení proudu. Zpravidla se k tomuto účelu používají tlumivky. Tím klesá účiník na hodnoty v rozmezí 0,3 – 0,6. Toto induktivní zatížení se kompenzuje pomocí kondensátorů. Používá se buď sériové nebo paralelní kompenzace.

U sériové kompenzace se zpravidla dosahuje dostatečné impedance pro signál HDO a tato kompenzace není tedy z hlediska HDO problematická.

Předřadné sériové kapacity a předřadné elektronické obvody jsou zpravidla z hlediska hromadného dálkového ovládání bezproblémové.

Při paralelní kompenzaci většího množství zářivek dosahují kompenzační kapacity značných hodnot, což může za určitých předpokladů vést k snížení úrovně signálu HDO a k flikru.