

↓ Villamosenergia-

minőség

növelt

részkeresztmetszettel

Feszültségesés

Feszültségletörés

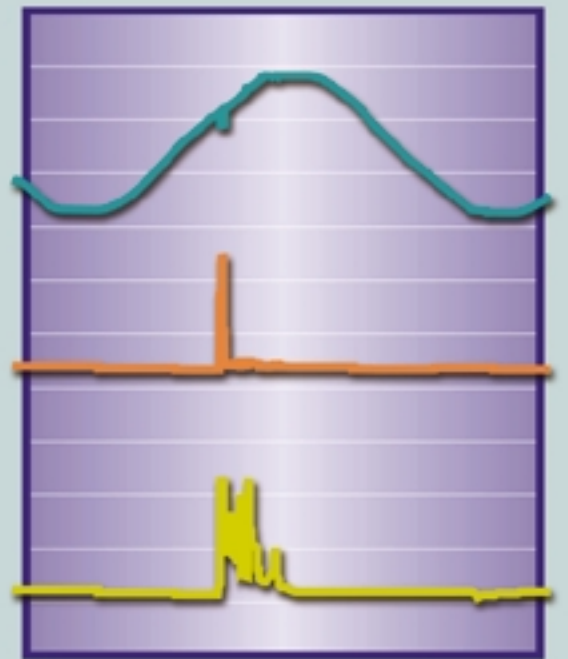
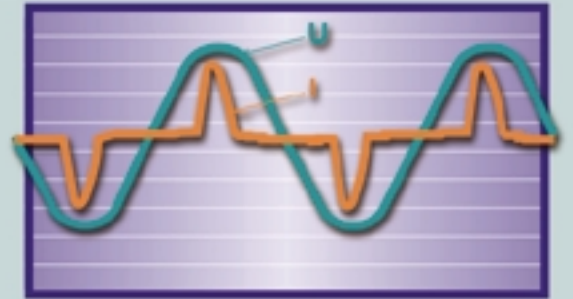
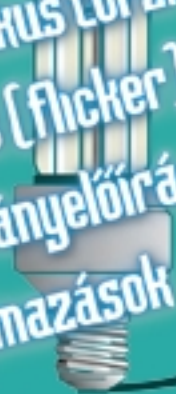
Feszültségnövekedés

Harmonikus torzítás

Villogás (flicker)

Szabványelőírások

Alkalmazások



MAGYAR RÉZPIACI KÖZPONT

Tartalom

Bevezetés	3
I. A villamosenergia-minőséget jellemző mutatók	5
1.1. A tápfeszültség nagysága	5
1.1.1. A feszültségcsökkenés definíciója és kialakulása	5
1.1.2. A feszültségeltérés által okozott problémák	6
1.1.3. A feszültség mérése	7
1.2. Feszültségletörés, feszültségnövekedés	7
1.2.1. A feszültségletörés [-növekedés] definíciója	7
1.2.2. A feszültségletörés [-növekedés] kialakulása	8
1.2.3. Hibajelenségek és következményeik a fogyasztói hálózaton	9
1.2.4. A feszültségletörés [-növekedés] mérése	9
1.3. Harmonikus torzítás	10
1.3.1. Harmonikusok keletkezése	10
1.3.2. A harmonikus áramok összegződése, terjedése a hálózaton	13
1.3.3. A harmonikusok által okozott problémák	20
1.3.4. A harmonikusok mérése	23
1.3.5. A harmonikusok által okozott problémák csökkentése	24

1.4.	Gyors feszültségváltozások (villogás vagy flicker)	25
1.4.1.	Definíció	25
1.4.2.	A villogás jelenség kialakulása	25
1.4.3.	A villogás terjedése a hálózaton	30
1.4.4.	A villogás zavaró hatása	32
1.4.5.	A mérési eljárás	32
2.	Szabványelőírások	37
2.1.	Harmonikusok	37
2.2.	Feszültségletörés, villogás	39
3.	A szabványnak megfelelő készülékek alkalmazása által okozott problémák	41
4.	Az új tervezői gyakorlat legfontosabb szempontjai	47

Bevezetés

Napjainkban a villamos energia fogyasztói összetételében jelentős változás van folyamatban. Ez a változás megfigyelhető az ipari, a kommunális és a világítástechnikai jellegű berendezéseknél egyaránt. A változás egyrészt az ún. információtechnológia (IT) köréhez tartozó berendezések szinte hihetetlen mértékű elterjedésének köszönhető, másrészt az energiatakarékos fogyasztói berendezések térhódításának. A fogyasztói struktúra változása visszahat a villamos energia minőségi mutatóira és befolyásolja az eddigi – a régi fogyasztói összetételhez alkalmazkodó – kifizetésű rézvezeték-keresztmetszet megválasztási-méretezési gyakorlatot.

A továbbiakban a villamosenergia-minőséget jellemző mutatókkal, a villamosenergia-minőség és a fogyasztók kölcsönhatásával, a villamosenergia-minőséggel kapcsolatos, a jelen témakör szempontjából fontos szabványok egyes részeivel foglalkozunk. Fentiek ismeretében összehasonlíthatjuk a szabványnak megfelelő készülékek hatását a villamos energia minőségére, egy hagyományos módon tervezett és egy, az új fogyasztói jellemzőket figyelembe vevő rézvezetékes ellátás esetén.

Végül a javasolt új tervezői gyakorlat legfontosabb szempontjait foglaljuk össze.

1. A villamosenergia-minőséget jellemző mutatók

A szabvány (MSZ EN 50160) által felsorolt, a kiefeszültségű hálózatra jellemző minőségi mutatók közül most csak azokat ismertetjük, amelyeket a fogyasztói készülékek befolyásolnak, és amelyek javíthatók a fogyasztói hálózat vezeték-keresztmetszetének növelésével. Ezek a következők:

- a tápfeszültség nagysága,
- a feszültségletörés,
- a harmonikus torzítás,
- a villogás (flicker).

A továbbiakban kitérünk a felsorolt minőségi mutatókkal kapcsolatos fontosabb ismeretekre.

!!! A tápfeszültség nagysága

A fogyasztók számára alapvető fontosságú a csatlakozási ponton rendelkezésre álló feszültség nagysága. A fogyasztói áram a tápláló vezetéken átfolyva a vezetéken feszültségesést hoz létre, amely a fogyasztói pont elhelyezkedésétől függően különböző értékű lehet, befolyásolva ezáltal a fogyasztó kapcsán kialakuló feszültség nagyságát. A feszültség tehát a villamosenergia-hálózatoknak lokális jellemzője. Az időben változó terhelések más részből időben változó feszültségesést eredményeznek, így a feszültség értéke nemcsak helytől, hanem időtől függő érték is. Az MSZ 1 szabvány szerint a kiefeszültségű hálózat feszültségét az áramszolgáló

mutatók a mérőhely hálózati csatlakozási pontján 2008. január 1-től $U_n^{+7,8}_{-7,4}$ %-os értéken tartják (átmenetileg megengedett az $U_n^{+5,2}_{-8,7}$ %), ahol $U_n = 230V$.

1.1.1. A feszültségesés definíciója és kialakulása

A feszültségesés egy U_S feszültségű táppont és egy U_R feszültségű fogyasztói pont között a következő összefüggéssel definiálható:

$$\Delta U = U_S - U_R$$

vagy százalékosan

$$\Delta U\% = \frac{U_S - U_R}{U_n} 100$$

ahol U_S , U_R és U_n abszolút értékek és fázisfeszültségek.

A feszültségesést általános esetben a

$$\Delta U = I_W R_H + I_M X_H$$

összefüggéssel (hosszirányú feszültségesés) közelítjük, ahol az R_H és X_H a hálózat impedanciájának ohmos és induktív része, I_W és I_M a fogyasztói áram hatásos és induktívnek feltételezett meddő komponense. Az alapharmikus feszültségesés számításánál egyfázisú fogyasztó esetén a $Z_F + Z_N$ hurokimpedanciát kell figyelembe venni, míg szimmetrikus háromfázisú fogyasztónál a Z_F fázisimpedanciát.

Az MSZ EN 61000-3-1 szabvány a kifestültségű fogyasztók hálózati viselkedésének vizsgálatához a fázisvezetőre $Z_F = 0,24 + j0,15$ Ohm, a nulla-vezetőre $Z_N = 0,16 + j0,1$ Ohm impedanciát ad meg 50 Hz-en.

A feszültségesésre a szokásos tervezési érték a névleges feszültség 2%-a névleges terhelés esetén. Ez az érték a kifestültségű fogyasztó mérőhelye és a fogyasztói készülék közötti feszültségesésre vonatkozik. Nem foglalkozunk az áramszolgáltatói közép/kifestültségű transzformátor és az elosztó tápkábel (hálózat) feszültségesésével. A feszültségesés összefüggésben szereplő impedancia két fő komponensből áll. Az induktív részt főleg a táptranzformátor szórásos induktivitása, míg az ellenállást elsősorban a kifestültségű vezeték ellenállása adja. Ezek aránya miatt kifestültségen jó közelítéssel a mérőhely és a fogyasztói készülék között $\Delta U \approx IR$.

1.1.2. A feszültségeltérés által okozott problémák

Amint láttuk, a szabvány a mérőhely csatlakozási pontján U_n $\begin{matrix} +7,8 \\ -7,4 \end{matrix}$ % értéket

garantál. A mérőhely és a fogyasztó között névleges terhelésnél 2% feszültségesést feltételezve (az MSZ 447 szabvány a méretlen hálózatra 1%-ot irányoz elő) a legrosszabb esetben is a feszültség a fogyasztókra előírt $U_n \pm 10\%$ -os feszültség-tűrésmezőn belül van. Amennyiben a feszültség nagyobb a fogyasztóra megengedett $U_n + 10\%$ -os értéknél, a fogyasztónál gyorsított élettartam-csökkenésre lehet számítani akár funkcionálisan (pl. izzólámpák esetében), akár a szigetelés öregedését tekintve. Ugyanakkor a veszteségek is növekednek. A feszültség további növekedése (15% fölé) a berendezések rohamos meghibásodását eredményezi.

A feszültség csökkenése egy ideig csak teljesítménycsökkenéshez vezet, ami izzólámpa esetén például azt jelenti, hogy egy 100 W-os izzó $U_n - 10\%$ -os feszültségen a névleges fényáramának 80%-át adja, a motorok nyomatéka csökken, tehát a névleges alkalmassági paramétereket nem tudják biztosítani a felhasználó számára. További feszültségcsökkenés fogyasztói típustól függően vezethet meghibásodáshoz (pl. IT berendezésben adatvesztés), vagy kikapcsoláshoz (pl. mágneskapcsoló öntartás megszűnése).

1.1.3. A feszültség mérése

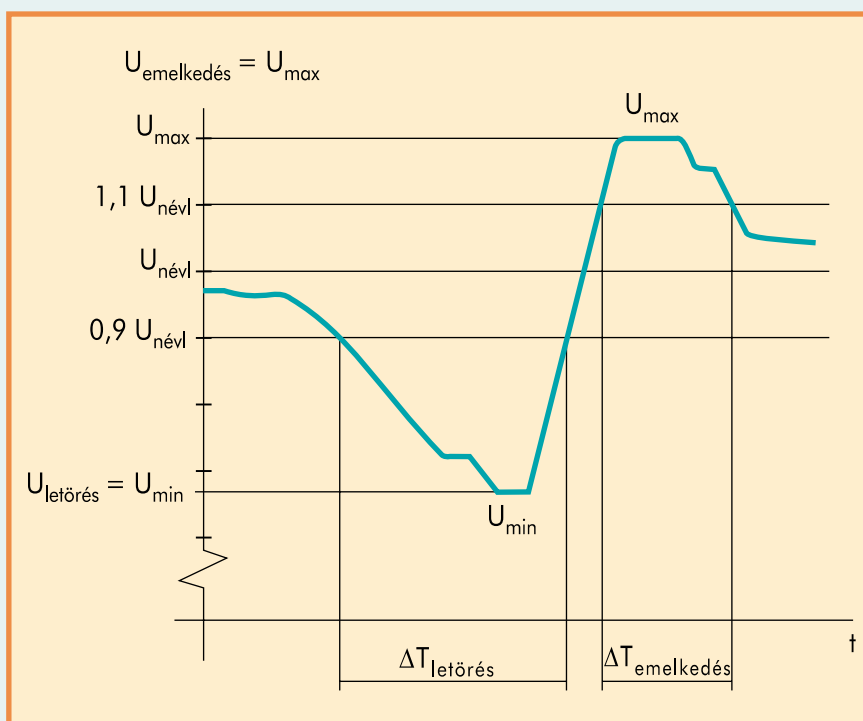
A feszültséget mérik pl. a fogyasztónál, az elszámolási mérőhelynél vagy egyéb pontokon. Mivel a fogyasztó számára a kapcsainál rendelkezésre álló feszültség nagysága a fontos, elegendő a feszültségek abszolút értékét venni figyelembe. A mérőeszköz és a mérési módszer tekintetében az MSZ EN 61000-4-7, valamint az MSZ EN 50160 szabványok a mértékadók. Digitális mérőműszerrel mérve 8 vagy 16 periódusnyi mért értékek közel valósidejű átlagát kell képezni 10 percenként úgy, hogy 10 s-onként legalább 3 s mért értéknek kell lennie, és a 10 perces átlagokat kell tárolni. Így rendelkezésre áll a feszültség lassú változására szolgáló mérési eljárás, ami alkalmas az áramszolgáltatói gyakorlatban alkalmazott statisztikai mutatók készítésére.

1.2. Feszültségletörés. feszültségnövekedés

1.2.1. A feszültségletörés [-növekedés] definíciója

A feszültségletörést a feszültség effektív értékére definiálták. Az MSZ EN 61000-3-3 szabvány szerint a feszültségletörés jellemzői: a letörés időtartama és a letörés időtartama alatti legkisebb relatív feszültség. (A relatív azt jelenti, hogy a névleges feszültségre kell vonatkoztatni a mért értékeket).

Az időtartamot úgy kell mérni, hogy amikor a névleges érték 90%-a alá csökken a feszültség, attól kezdve tart a feszültségletörés időtartama egészen addig, amíg újra nem emelkedik a névleges érték 90%-a fölé. Ha 1% alá



1. ábra
A feszültségletörés és
-növekedés definíciója

csökken, azt feszültségkiesésnek nevezük. Háromfázisú rendszerben bármelyik fázisban bekövetkező feszültségletörést a rendszerben létrejött feszültségletörésnek tekinti a szabvány.

A feszültségletöréshez hasonlóan a feszültségnövekedés is az időtartamával és a relatív nagyságával van jellemezve azzal az eltéréssel, hogy a névleges érték 110%-át meghaladó feszültség esetén beszélünk feszültségnövekedésről.

A feszültségletörés és -növekedés definícióját az 1. ábrán ismertetjük.

1.2.2. A feszültségletörés (-növekedés) kialakulása

A hálózat állandósult állapotában a feszültség effektív értéke az erre megadott tűrésmezőn belül van. Ez az érték feszültségszintenként változó, a kifestültségű kommunális hálózaton az 1.1 pontban megadott értékek érvényesek.

Az MSZ EN 50160 szabvány előírása szerint az év bármely 1 hetében mérve a feszültség effektív értékének a 10 perces átlagértékekből képzett statisztikáját tekintve az összegzett eloszlásfüggvény 95%-os értékének kell a tűrésmezőn belül lennie. A fennmaradó 5%-ra vonatkozóan (ami az egyhetes intervallumra kerekben 8 órát jelent) nincs előírás. Ez persze nem azt jelenti, hogy ekkor a feszültség akármekkora lehet, hiszen a rendszer fizikájából következően a fe-

szültség csak rövid időkre tér el az előírt értéktől.

A keletkezéssel kapcsolatosan szét kell választani a fogyasztó által okozott illetve befolyásolható jelenségeket a fogyasztó által nem befolyásolható jelenségektől.

Ez utóbbihoz tartoznak a hálózaton bekövetkező hibák (pl. zárlatok, szakadások, berendezésmeghibásodások) miatti rövid idejű (a védelmek működésével hárítható) vagy hosszabb idejű (ellátási zavarok) feszültségkiesések is.

Az átmeneti feszültségletörési (-növekedési) eltérések oka lehet a villamosenergia-rendszer szabályozási hibája, ez is a villamosenergia-szolgáltató felelősségi körébe tartozik (pl. hirtelen terhelésnövekedést vagy -csökkenést követően).

A fogyasztó által okozott feszültségcsökkenési, -letörési események a fogyasztói hálózaton keletkeznek és jól méretezett elosztóhálózatot feltételezve az elszámolási pontokon a hatások már olyan kis mértékűek, hogy ugyanarra az elosztóhálózatra csatlakozó idegen fogyasztónál ne zavarják a fogyasztó rendeltetésszerű működését.

Ugyanakkor azonban a fogyasztónál, aki a zavart okozza, ha a saját hálózata nem megfelelően méretezett, saját zavarérzékeny fogyasztóinál hibás működést idézhet elő. Általában a nagy bekapcsolási áramlökéssel induló fogyasztók okozzák a megengedettnél nagyobb feszültségletöréseket.

1.2.3. Hibajelenségek és következmények a fogyasztói hálózaton

A fogyasztói hálózaton feszültségletörést előidéző eseményeket és következményeiket az alábbiakban foglaljuk össze:

- laza vezetékkötések, amelyek az érintkezés – rossz érintkezés – nem érintkezés között változnak
következmény:
 - a feszültséggörbe egyenetlensége (feszültségletörés jellegű);
 - rádiófrekvenciás zavarás (TV - rádió);
 - a laza vezetékkötésnél beégés, esetleg tűz;
 - a feszültségletörésre érzékeny fogyasztók (IT) hibás működése.
- nagy bekapcsolási áramlökéssel induló fogyasztók (pl. mikrohullámú sütő, porszívó, hőtárolós vízmelegítő, különböző világítótestek stb.)
következmény:

- feszültséglehúzás a bekapcsolási áramlökés idejére;
- a feszültségletörésre érzékeny fogyasztók (IT) hibás működése.

1.2.4. A feszültségletörés [-növekedés] mérése

Láttuk az 1.2.1. fejezetben a feszültségletörés definíciójánál, hogy a feszültség effektív értékének megváltozását kell mérni. A szabvány a legrövidebb mérendő időnek a 0,5 periódust tekinti. A mérőműszernek igazi effektív értéket kell mérnie. A mérések megjelenítése, feldolgozása többféle lehet. Tárolható a félperiódusonkénti effektív érték időfüggvénye, a definíció szerinti triggereléssel

$$\left(1,1 < \frac{U}{U_n} < 0,9\right)$$

indítva és leállítva a mérést. Az így kapott időfüggvényekből később tetszőleges statisztika készíthető.

$t \geq$ $t <$	20 ms 100 ms	100 ms 500 ms	500 ms 1 s	1 s 3 s	3 s 20 s	20 s 1 min	1 min 3 min	3 min
10 < d ≤ 15								
15 < d ≤ 30								
30 < d ≤ 60								
60 < d ≤ 99								
99 < d								
110 < r _{rms} ≤ 120								
120 < r _{rms} ≤ 140								
140 < r _{rms} ≤ 160								
160 < r _{rms} ≤ 200								
200 < r _{rms}								

I. táblázat

A NORMCOMP javaslata a feszültségletörés (-növekedés) mérési eredmények statisztikus kiértékelésére (d: a feszültségletörés százalékos értéke)

Ennél egyszerűbb megoldás, ha a definíció szerinti adatok vannak tárolva az első átlépés

$$\left(\frac{U}{U_n} < 0,9\right), \text{ vagy } \left(\frac{U}{U_n} > 1,1\right) \text{ időpont-}$$

jával. További egyszerűsítés, ha a mérés közben valós idejű statisztika készül, ami a definíció szerinti adatok alapján egy előre elkészített mátrix elemeinek a számosságát növeli. Ilyenkor a letörés vagy növekedés időpontja nem kerül rögzítésre. Az ilyen jellegű statisztikára vonatkozóan nincs szabványelőírás.

A NORMCOMP (az IEC mellett működő szakértői csoport) javaslata egy, az alább közölt mátrix, amely a feszültség-letörés (növekedés) mérések statisztikai kiértékelésének egy lehetséges megjelenítése.

A mérések időtartamára vonatkozóan előírás nincs. A javasolt időtartam négy hét.

1.3 Harmonikus torzítás

1.3.1. Harmonikusok keletkezése

A feszültségesés egyik tényezője a vezeték ellenállása, másik a vezetékben folyó áram. Kérdés, hogy a kifestültségű fogyasztói összetétel változása hogyan hat a fogyasztói áramra. Az első ösztönös válasz, hogy energiatakarékos szinte minden fogyasztó a mosógéptől a porszívón keresztül a televízióig, tehát

csökken a fogyasztói áram. A 2. ábrán egy színes televízió áramfelvételének időfüggvényét és ennek Fourier-spektrumát mutatjuk be. Az ábrán látható, hogy a szinuszos feszültségre kapcsolt televízió árama periodikus ugyan, de nem szinuszos, illetőleg nem adható meg egyetlen frekvenciájú szinusz hullámmal. Az ilyen jellegű időfüggvények az úgynevezett Fourier-sorral jellemezhetők.

Általános esetben végtelen számú szinuszos és koszinuszos tag összegével adható meg egy periodikus időfüggvény. Egy T periódusidejű függvény Fourier-sora:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)]$$

ahol

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

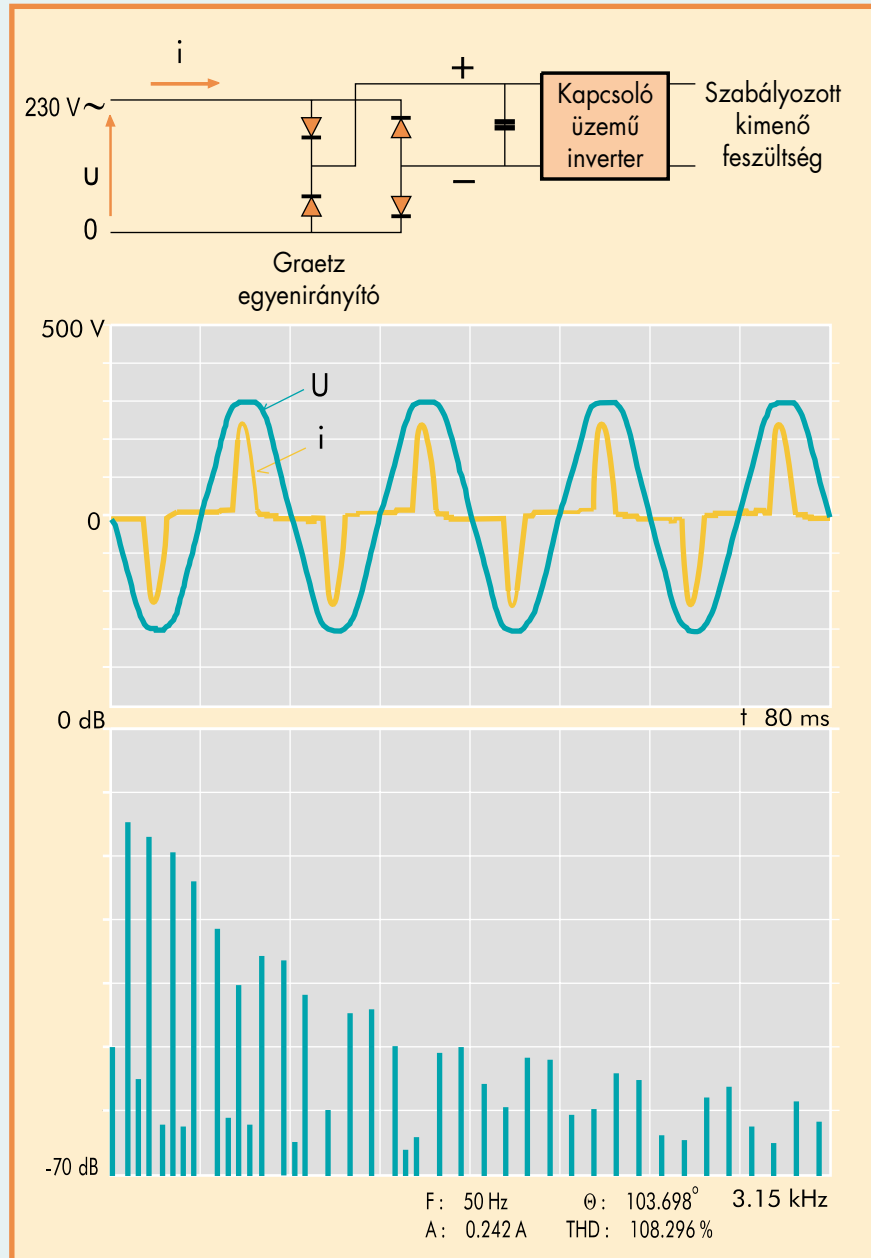
$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) d(\omega t)$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \cos(k\omega t) d(\omega t)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \sin(k\omega t) d(\omega t)$$

$$k = 1 \rightarrow \infty$$

A 2. ábrán a spektrumvonalak a Fourier-sor növekvő frekvenciájú komponenseit



mutatják. A vízszintes tengelyen a frekvencia, a függőleges tengelyen az amplitúdó (dB skálán) olvasható le. Az 50 Hz-nél (alapharmonikus) nagyobb frekvenciájú összetevőket felharmonikusoknak nevezzük. A felharmonikus vagy röviden harmonikus áramok a vezetéken a hálózat felé záródnak, és a vezetéken harmonikus feszültségesést hoznak létre. A harmonikus feszültségesések a feszült-

ség jelalakját torzítják a tiszta szinuszos jelalakhoz képest. A harmonikusokat vagy frekvenciájukkal (pl. 250 Hz) vagy frekvenciájuknak az alapharmonikus frekvenciára viszonyított értékével (pl. $250/50 = 5$) jellemezzük. Ez utóbbi rendszámnak nevezzük, jele k. Azokat a fogyasztókat, amelyek a 2. ábrán látható esethez hasonlóan a szinuszos feszültségre kapcsolva nemszi-

nuszos periodikus áramot vesznek fel, nemlineáris fogyasztóknak nevezzük. A fogyasztói áramfelvétel lehet időben állandó és időben változó. Az előbbi esetben a harmonikus áramok amplitúdója és frekvenciája időben állandó, az utóbbi esetben a változási sebességtől függően beszélhetünk vonalas spektrumú (lassú változás) és folytonos spektrumú (gyors változás) frekvenciakarakteristikáról.

A harmonikusokat tehát a villamosenergia-rendszer nemlineáris fogyasztói keltik. (A hagyományos impedanciájú fogyasztókat, ahol az áram szinuszos és legfeljebb siet vagy késik a feszültséghez képest – ohmos + kapacitív, ohmos + induktív – lineáris fogyasztónak nevezzük. Ezek amplitúdó-frekvencia spektruma egyetlen vonalat tartalmaz, az alapharmonikusét.)

Néhány példa a kisfeszültségű nemlineáris fogyasztókra:

Időben állandó: telítődő vasmagot tartalmazó fogyasztók, információtechnológiai berendezések, kompakt fénycső elektronikus előtéttel.
Lassan változó: fényerő-szabályozós lámpák, tirisztorral szabályozott berendezések, mikrohullámú sütő.
Gyorsan változó: fordulatszám-szabályozott villamos hajtások, impulzus-szélesség-modulált inverteres hajtások (a terhelési ciklustól függ a besorolás, hegesztőberendezések).

A fogyasztó nemlinearitásának mértékére bevezetett mérőszám az áramra vonatkozó teljes harmonikus torzítás

(THD_I), valamint az egyedi harmonikus torzítás (D_I):

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \quad D_I = \frac{I_k}{I_1}$$

ahol I_1 az alapharmonikus áram;
 I_k a k rendszámú felharmonikus áram.

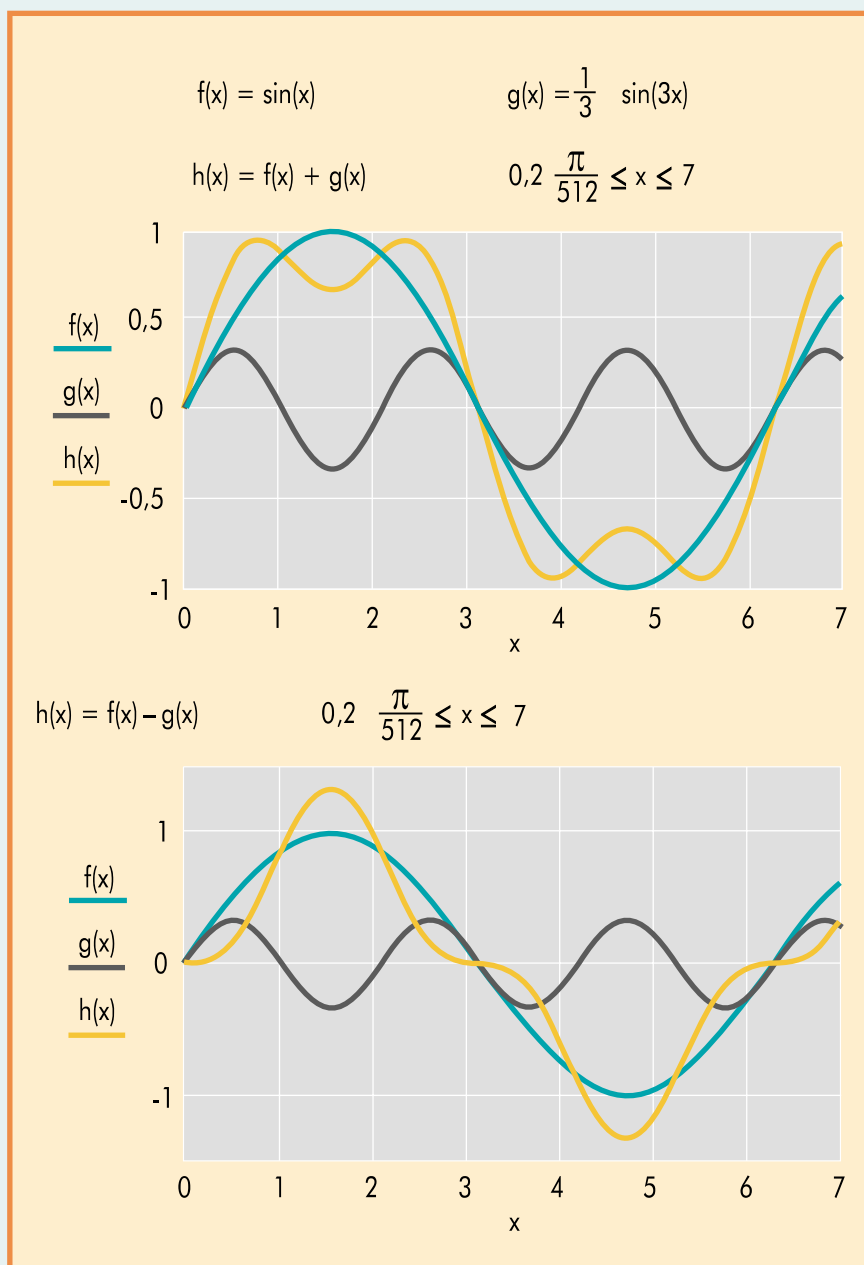
Az egyedi és a teljes harmonikus torzítást mint mérőszámot a feszültségre is alkalmazzák (THD_U és D_U).

Kiszámítása azonos az áraméval.

A napjainkban a kisfeszültségű hálózatra csatlakozó, 16 A-nél kisebb áramfelvételű nemlineáris fogyasztóknál a legelterjedtebb tápegység az úgynevezett kapcsolóüzemű táp, amelynek a hálózatra csatlakozó bemeneti áramköre egy egyfázisú Graetz egyenirányító, kapacitív szűrővel a közbenső egyenáramú körben. A kapcsolást és az áramfelvételt a 2. ábra mutatja.

Amint az ábrán látható, a szinuszos tápfeszültség csúcsértékéhez van "szinkronizálva" a töltőáram, amely a kondenzátort utántölti. Ezek az egy- és háromfázisú feszültséginverterek lényegében egymással fázisban levő harmonikusokat hoznak létre. Különösen igaz az azonos fázisúság a kisebb rendszámokon, így a 3. és 5. harmonikus áramokra, amelyeknek a legnagyobb az amplitúdójuk.

Így nem véletlen, hogy a kisfeszültségű hálózatokon a 3. és 5. harmonikus torzítás a jellemző áramban és feszültségben egyaránt. A 3. ábra példaképpen a 3. harmonikus fázishelyzetének



3. ábra
Harmadik harmonikus és kezdő fázisának hatása az eredő jelalakra

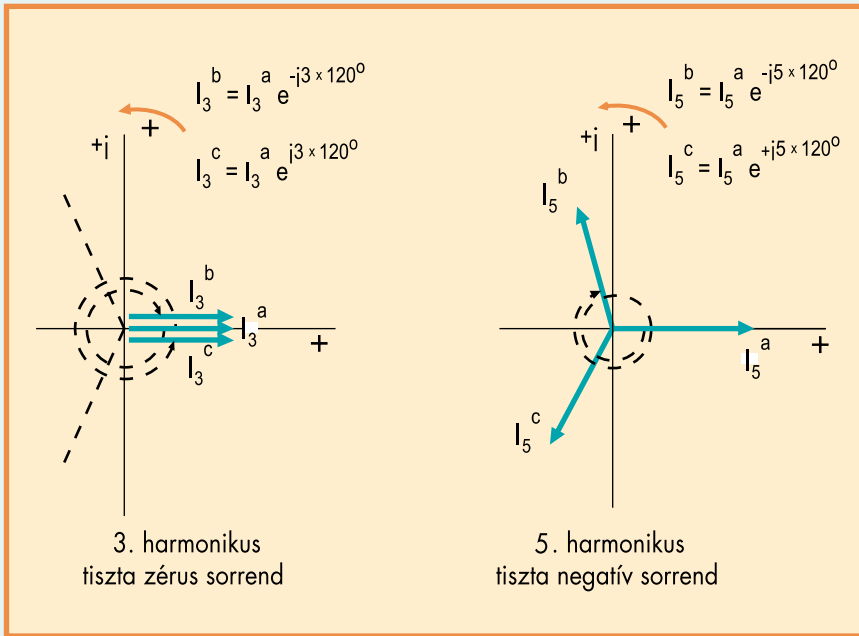
hatását mutatja az eredő időfüggvény jelalakjára.

1.3.2. A harmonikus áramok összegződése, terjedése a hálózaton

A háromfázisú rendszerben a harmonikusok is háromfázisú mennyiségek, csak a rendszámnak megfelelő frekven-

ciával. Ugyanúgy ábrázolhatók a forgó koordináta-rendszerben, mint az alap-harmonikus fazorok és a fáziskövetési sorrend a forgásirányban meghatározza a harmonikus szimmetrikus összetevőket.

A 4. ábrán egy szimmetrikus háromfázisú rendszer 3. és 5. harmonikus szimmetrikus összetevőit adjuk meg. Így a 3. harmonikusra zérus, az 5. har-



4. ábra
Háromfázisú rendszer szimmetrikus 3. és 5. harmonikus áramainak szimmetrikus összetevői

monikusra negatív sorrendet ad a követési szabály. Általánosítva a k-adik rendszámú harmonikusra

$$I_b^k = I_a^k e^{-jk120^\circ} \quad \text{és} \quad I_c^k = I_a^k e^{-jk240^\circ}$$

Általánosítva a harmonikusokra a fentieket a szimmetrikus háromfázisú harmonikusok pozitív, negatív és zérus sorrendű követési sorrendje rendszám szerint a következő:

zérus sorrendű harmonikusok:

$$k = 3n$$

pozitív sorrendű harmonikusok:

$$k = 3n + 1$$

negatív sorrendű harmonikusok:

$$k = 3n - 1$$

ahol k a felharmonikus rendszám és n = 1, 2 . . .

A fentiekből következik, hogy az azonos fázisú 3. harmonikus áramok zérus sorrendű jelleggel összegződnek és a nullavezetőben a fázisvezető 3. har-

monikus áramának háromszorosa folyik. Mivel, mint láttuk a feszültséginverteres kapcsolásban a 3. harmonikus áram amplitúdója közel akkora, mint az alapharmonikus áramé, a $THD_1 \geq 100\%$, a háromfázisú rendszer nullavezetőjében kb. kétszer akkora eredő áram folyik, mint a fázisvezetőben.

Az 5. harmonikus szimmetrikus esetben negatív sorrendű, ezért a nullavezető áramában csak az aszimmetrikus – zérus sorrendű – komponense van jelen. A harmonikus áramok szimmetrikus összetevőinek ismeretében az egyes nemlineáris fogyasztók által termelt harmonikus áramok összegezhetőek aszimmetrikus esetre is. Külön-külön számítani kell az egyes fogyasztói harmonikus áramokat fázishelyen. Az egyes fogyasztói áramok harmonikusenkénti fázishelyes eredője adja az eredő harmonikus áramot leágazásonként, a leágazási áramok fázishelyes összege az eredő transzformátoráram.

Szimmetrikus esetben elég az egyfázisú helyettesítéssel számolni: A k-adik harmonikus áram pozitív, negatív vagy zérus sorrendű a $3n + 1$; $3n - 1$; $3n$ szabálynak megfelelően. Az egyszerű áttekinthetőség érdekében a továbbiakban szimmetrikus esetet (fogyasztó és hálózat) feltételezünk. Az áramok összegzése rendszámonként a

$$\operatorname{Re}[I_k] = \sum_i \operatorname{Re}[I_k^i] \quad \operatorname{Im}[I_k] = \sum_i \operatorname{Im}[I_k^i]$$

$$\operatorname{Re}[I_k^i] = I_k^i \cos \varphi_k^i \quad \operatorname{Im}[I_k^i] = I_k^i \sin \varphi_k^i$$

$$\varphi_k = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}[I_k]}{\operatorname{Re}[I_k]}$$

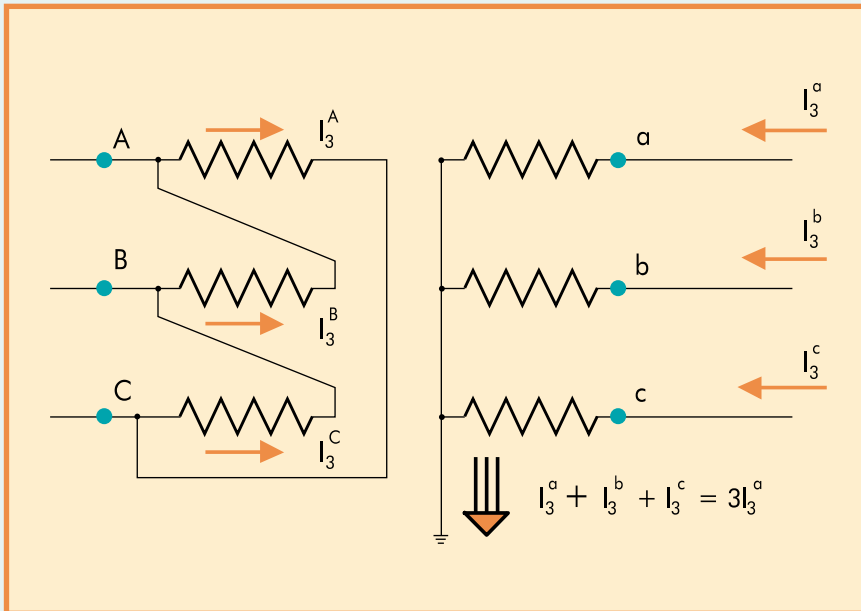
összefüggések szerint történik, ahol i az i -edik fogyasztót jelenti, φ_k^i szög az i -edik fogyasztó k -adik harmonikus áramának szöge a k -adik harmonikus feszültséghez képest.

A k -adik harmonikus feszültséget a gyűjtősinen mérjük. Itt kell megjegyezni, hogy a különböző típusú nemlineáris fogyasztókra alapvetően két módon modellezhető a harmonikus áramok szögének hozzárendelése. Az áraminvertereknél az alapharmonikus áramhoz köthetjük a felharmonikus áram szögelését. Így például, ha az alapharmonikus áram φ szöggel késik a feszültséghez képest, a k -adik harmonikus áram $k\varphi$ szöggel lesz eltolva. A feszültséginverteres átalakítóknál (főleg IT berendezések) a harmonikus áramok

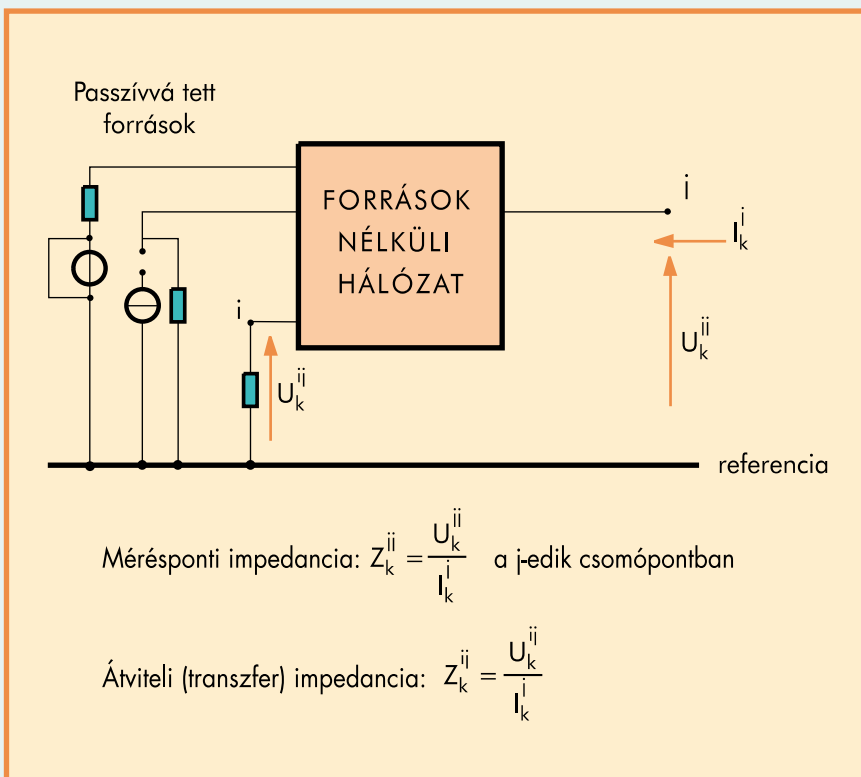
szöge a tápfeszültséghez rendelhető, mivel az alapharmonikus áram fáziseltolása a tápfeszültséghez képest gyakorlatilag állandó. Az ilyen típusú fogyasztók 3. és 5. harmonikus árama a domináns és ezek lényegében fázishelyesen összegződnek. Mivel ezek a fogyasztói típusok alapvetően a kisműködésű hálózatra csatlakoznak, az itt keletkező 3. és 5. harmonikus áramok fázisban összegződve záródnak a közép/kisműködésű táptranzformátor kisműködésű tekercsén.

A közép/kisműködésű transzformátorok delta/földelt csillag kapcsolásúak (Dyn). A zérus sorrendű jellegű harmadik harmonikus a kisműködésű oldalról gerjeszti a transzformátort és a közép-feszültségű delta tekercsben ki tud alakulni a zérus sorrendű ellengerjesztés. Ez a folyamat követhető az 5. ábrán. Így a közép-feszültségű tekercs mintegy rövidzárt alkot a szimmetrikus, tehát zérus sorrendű 3. harmonikusra. Itt látható az is, hogy a transzformátor kisműködésű oldalán a csillagponton keresztül a nullavezető illetve a földelő vezető (ha egyesítve van a nullavezetővel) a fázisáram harmadik harmonikus tartalmának háromszorosát vezeti. Az is belátható, hogy a transzformátor tekercsvesztése is jelentősen megnő a 3. harmonikus többletáram következtében.

Ugyanakkor a szimmetrikus 5. harmonikus áram negatív sorrendű és áthalol a közép-feszültségű hálózat felé. Természetesen ez az áram is többletvesztést okoz a transzformátorban.



5. ábra
Kisfeszültségű
oldalon keletkezett 3
harmonikus áram
gerjesztési viszonyai
közép/kisfeszültségű
transzformátoron



6. ábra
A mérésponeti és transz-
fer impedancia defini-
ciója a k-adik
rendsámra

Adott 3. harmonikus áramra a 3. harmonikus feszültségtorzulást a transzformátorkapcsokon a transzformátor 3. harmonikus zérus sorrendű impedanciája szabja meg, ami közelítőleg háromszorosa a pozitív sorrendű alaphar-

monikus szórési impedanciának:

$$U_3^r \approx I_3 3X_{tr}$$

Az 5. harmonikusra nézve azonban más a helyzet.

A harmonikus áramok mint aktív forrásból – áramgenerátorból – eredő mennyiségek, a mögöttes hálózat (táphálózat) eredő impedanciáját "látják". Ez az impedancia a harmonikus tartományban jelentősen eltér attól az értéktől, ami az alapharmonikus zárlati teljesítményből számítható a fogyasztói csatlakozási ponton (Thevenin impedancia). Ismerve a névleges feszültséget, az alapharmonikus ún. rövidzárlati mérési ponti impedancia:

$$Z_H \approx X_H \approx \frac{U_{nv}^2 [\text{kV}]}{S_z^{3F} [\text{MVA}]} [\Omega]$$

ahol Z_H : Thevenin impedancia az alapharmonikus frekvencián;

U_{nv} : névleges vonali feszültség;

S_z^{3F} : háromfázisú szimmetrikus zárlati teljesítmény.

Felharmonikus szempontból nézve a hálózatot a fogyasztó csatlakozási pontjáról, a Thevenin elv alkalmazható frekvenciánként és fogyasztónként. Így tehát egy fogyasztót tekintve egy adott frekvencián úgy határozható meg a felharmonikus mérési ponti impedancia, hogy a hálózatból kiemeljük az aktív fogyasztót, amely felől az impedanciát meg akarjuk határozni és a hálózatot passzívvá tesszük. Ekkor az összes áramgenerátort és feszültséggenerátort el kell távolítani a hálózatból úgy, hogy bemenő impedanciájukkal szerepeljenek. Az ily módon passzívvá tett hálózatra az aktív fogyasztó csatlakozási pontján injektáljuk a k-adik frekvenciájú áramot és a csatlakozási

ponton mérjük a k-adik frekvenciájú feszültséget. Ha egységnyi az injektált áram, a mért feszültségérték éppen a keresett impedancia számértékét adja. Ezzel a módszerrel mérhető az aktív fogyasztó hatása más hálózati csomóponton. Ha az egységnyi injektált áram hatására létrejött feszültséget mérjük más csomóponton, a két érték hányadosa az ún. átviteli vagy transzfer impedancia. Létrehozva a passzív hálózat \underline{Y}_H^k csomóponti admittancia mátrixát, a k-adik rendszámra felírható

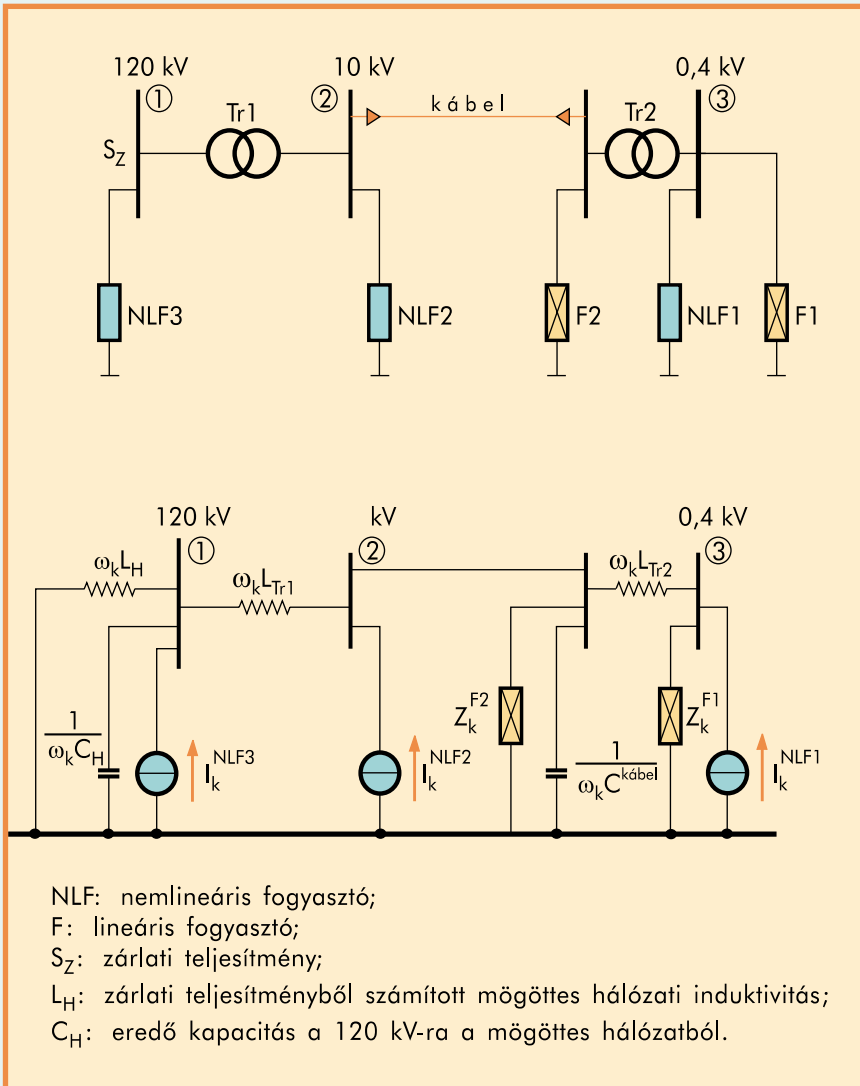
$$\underline{I}^k = \underline{Y}_H^k \underline{U}^k \quad \underline{U}^k = \left[\underline{Y}_H^k \right]^{-1} \underline{I}^k$$

ahol $\underline{Z}_H^k = \left[\underline{Y}_H^k \right]^{-1}$ a keresett impedancia mátrix.

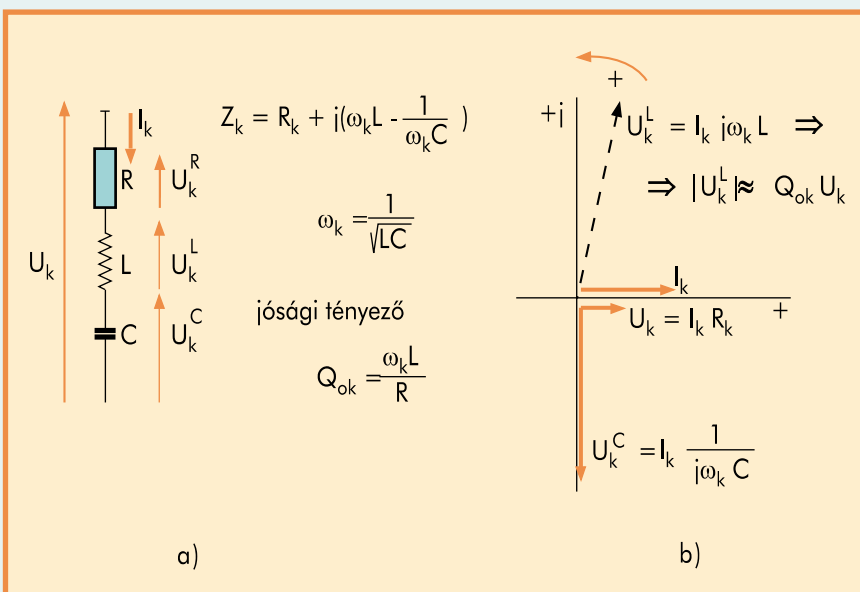
A mátrix főátlójában lévő elemek a mérési ponti impedanciák, a többi elem átviteli impedancia. A mérési ponti és transzfer impedancia definícióját a k-adik rendszámra a 6. ábrán adjuk meg. A továbbiakban egy egyszerű hálózati példán (7. ábra) megvizsgáljuk a mérési ponti impedancia alakulását a kisműködésű, a közép- és a nagyfeszültségű hálózat felől.

Ha a kisműködésű hálózatra csatlakozik nemlineáris terhelés, harmonikus árama (a 7. ábrán I_k^{NLF1}) a mögöttes hálózat felé záródik. A 0,4 kV-os feszültségtorzulás a k-adik rendszámra 0,4 kV-os gyűjtősínről k-adik rendszámra mért mérési ponti impedancia és az I_k áram szorzata:

$$U_k^{0,4kV} = Z_k^{0,4kV} I_k^{NLF1}$$

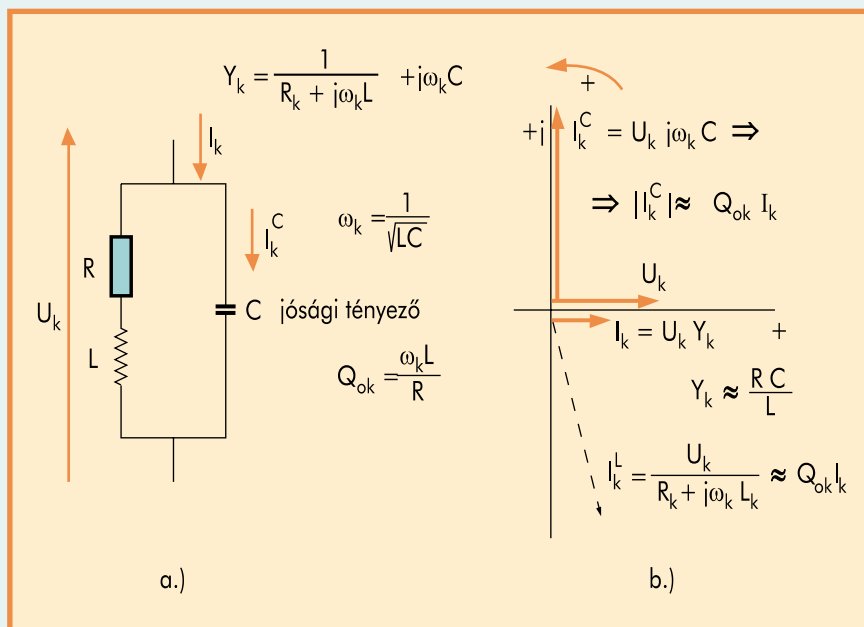


7. ábra
 Nemlineáris fogyasztók hálózati hatása
 A hálózat egyvonalas sémája és harmonikus helyettesítése a k-adik rendszámra



8. ábra
 Soros rezonancia R - L - C körben (k-adik rendszám)
 a) áramkörti egyenletek
 b) fazorábra

9. ábra
Párhuzamos rezonancia
R - L - C körben
(k-adik rendszám)
a) áramkörti egyenletek
b) fázorábra



A 7. ábra 3 csomópontos hálózatának impedancia mátrixában ez az elem a $Z_{3,3}^k$. Ha az I_k^{NLF1} áram hatására a 10 kV-os gyűjtősínen létrejövő feszültséget szeretnénk kiszámítani, ahhoz a $Z_{2,3}^k$ transzfer impedanciát kell ismerni. A 7. ábra hálózata még ebben az egyszerű esetben is viszonylag bonyolult L - C hálózat, amely soros és/vagy párhuzamos rezonancia vagy rezonancia közeli állapotban kiemelheti a k-adik rendszámú áramot vagy feszültséget, ami azt jelenti, hogy a névleges (injektált) áramnál jóval nagyobb részáramok folyhatnak a hálózat egy-egy elemén. Kapacitások nélküli hálózat esetén a harmonikusok terjedése és értéke könnyen követhető lenne, mivel a részáramok az áramosztás szerint számíthatók lennének. A kondenzátorok hatására azonban soros vagy párhuzamos rezgőkörök, ezek kombinációja alakul ki, ami rendkívül bonyolítja a helyzetet. A 8. és a 9. ábrák kapcsán a soros és párhuzamos

rezgőkörök alapvető tulajdonságait tekintjük át. (A hálózaton az induktivitások például a transzformátorok szórási induktivitásai, a kondenzátorok lehetnek kábelkapacitások vagy fázisjavító kondenzátortelepek.)

A 8. és 9. ábrákon látható, hogy a soros rezgőköri részfeszültség-növekedés illetve a párhuzamos rezgőköri részáram-növekedés a jósági tényezővel arányos. Az erősáramú hálózatokon a jósági tényező 10 körüli érték, függ a hálózat terhelési állapotától (a fogyasztói terhelések csökkentik az eredő jósági tényezőt, mivel általában nagyobb részt ohmos jellegűek és csillapítás növelő hatásúak).

A harmonikusok hálózati terjedését illetően tehát általános szabály nem mondható ki, minden esetben egyedi vizsgálatot kell végezni annak megállapítására, hogy kialakulhat-e rezonancia a hálózaton, ami teljes mértékben

megváltoztatja a harmonikus terjedési viszonyokat. Láttuk, hogy lényegében a mérésponti és átviteli (transzfer) impedanciák ismerete nélkül a kérdésre csak méréssel adható válasz.

Az impedancia vagy számítható (ekkor a hálózat kellően pontos modellezése szükséges a harmonikus tartományban) vagy mérhető (a mérést élő hálózaton kell végezni, mert a kikapcsolt hálózat harmonikus impedanciája jelentősen eltér az élő hálózattól). Fentiekből látszik, hogy akár a számítógépi szimuláció, akár a mérés nagy felkészültséget igényel.

1.3.3. A harmonikusok által okozott problémák

- Hálózati rezonancia egyes harmonikus rendszámokon, ami feszültség- illetve áram-túligénybevételt okozhat.
- Hálózati elemek túlterhelődése, túlmelegedése (kábelek, transzformátorok).
- Téves védelmi működések (pl. bekapcsolási áramlökésre transzformátor differenciálvédelem működés).
- Postai vonalak zavarása (a légvezetékben folyó zérus sorrendű harmonikus áramok a postai vezetékbe történő átindukálása következtében).
- Gyűjtásszögvezérelt berendezések hibás vezérlése.

Fentiek közül a kommunális kiefeszültégű hálózatokon elsősorban a melegedés, többletveszteségek, biztosító-

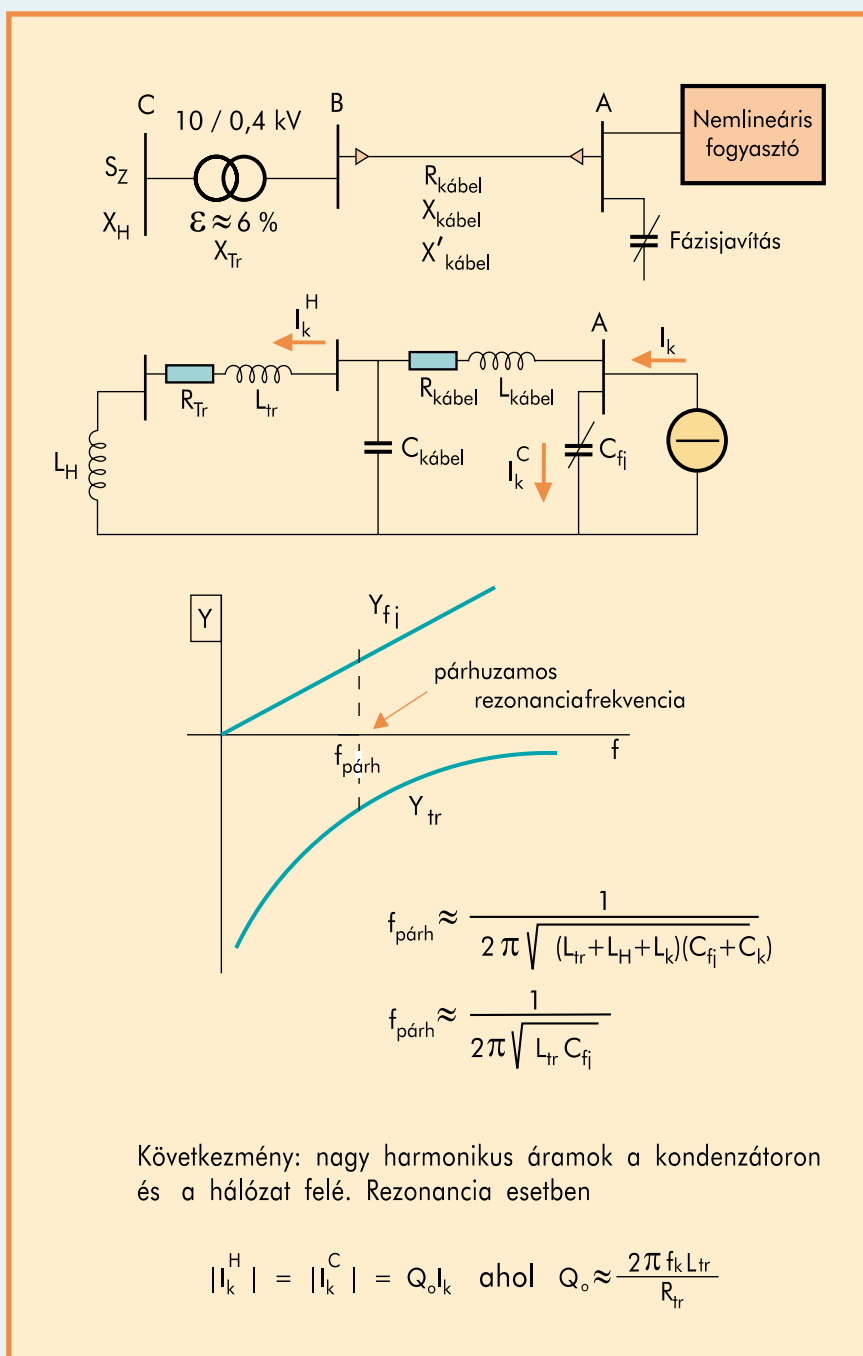
kiolvadás, kismegszakító-leoldás, a hálózati rezonancia és a gyűjtásszögvezérelt berendezések hibás üzeme jelentenek veszélyt.

Külön kell foglalkozni a kiefeszültégű berendezéseknél rendkívül elterjedt kapcsolóüzemű tápegységek kondenzátoros szűrésű egyenirányítós bemenetének hálózati visszahatásával. Ez a tápegységmegoldás a watt-kilowatt teljesítményű berendezéseknél gyakorlatilag kizorított minden mást. A primer áram jelalakot szemlélteti a 2. ábra. Az áram tartalmazza a páratlan rendszámú harmonikusokat, amelyek közül a 3. harmonikus a legnagyobb. Látható, hogy a fogyasztó áramfelvétele a feszültséghez van mintegy szinkronozva, és a feszültség csúcsértéke körül van az áramnak egy rövid ideig tartó nagy értéke (ez idő alatt töltődik az egyenirányító szűrő kondenzátora). Az áram harmadik harmonikusa is ilyen módon a feszültséghez van szinkronozva. Ha a három fázisról azonos teljesítményű fogyasztókat (pl. három színes TV készüléket) üzemeltetünk, a feszültségek 120° -os eltolása csak az alapharmonikus áramra nézve eredményez 120° -os eltolást és így a pillanatértékre nulla összegű áramot, a 3. harmonikusra, mint azt a 4. ábrán bemutattuk, a három fázis 120° -os eltolása összegződést jelent ($3 \times 120^\circ = 360^\circ$) és a nullavezetőn a három fázisáramban folyó harmadik harmonikus áramok összege fog folyni.

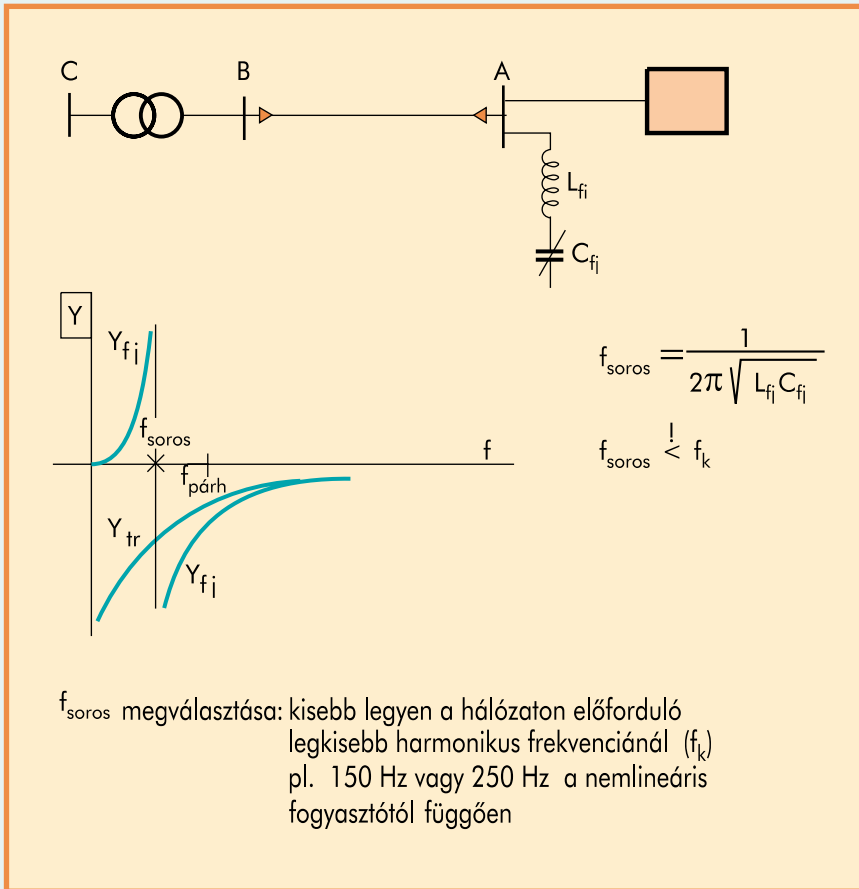
Egyes típusú, kis bemeneti fojtású feszültséginvertereknél az áram harmadik

harmonikus tartalma akár meg is haladhatja az alapharmonikus áram értékét, a kisfeszültségű négyvezetékes hálózatban a nullavezetőn a fázisvezető áramának 2-3-szorosa is folyhat, ha a terhelések többsége ilyen jellegű (pl. irodaházak központi inverter nélkül). Ez a tény a tervezői gyakorlatban még

nem vált közismertté, így a nullavezető keresztmetszete az esetek többségében a fázisvezető keresztmetszetével azonos. A nullavezető jelentős túlmelegedése várható a fentiek következtében. A kisfeszültségű hálózaton jelentkező sajátos probléma a feszültség változása által okozott gyújtásszögváltozás az



10. ábra
Fojtózatlan fázisjavító kondenzátorteleg párhuzamos rezonanciát okoz a hálózati induktivitással



II. ábra
Fojtózatlan fázisjavító kondenzátor telep párhuzamos rezonanciát megszünteti, ha $f_{soros} < f_k$

elektronikus előtétes energiatakarékos kompakt lámpák esetében, ami fényáramváltással jár és villogást okoz. A feszültség változását okozhatja a harmonikus tartalom megváltozása, vagy az 1.2.3 pontban említett feszültségletörést okozó esemény.

A feszültség harmonikus tartalmának például rezonancia miatti megnövekedése okozhat nem várt működést olyan berendezésekben, amelyekben beépített védelem van feszültségtorzulásra. Ilyenek például a szünetmentes tápok, amelyek 5%-os nagyságú 5. harmonikust engednek meg a bemenetükön, ennél nagyobb értéknél kikapcsolnak és a kimenetükről táplált számítógépek kiesnek. A rezonancia létrejöttét kifestült-

szerű hálózaton a 10. és 11. ábrák kapcsán vizsgáljuk.

Nagyobb teljesítményű fogyasztók esetén (ilyen már egy irodaház, bevásárlóközpont is) az üzemeltetők szinte kivétel nélkül alkalmaznak meddőteljesítmény-kompenzálást (népszerű nevén fázisjavítást). A fázisjavításra automatikus hangolású kondenzátortelegek kaphatók. Itt hívjuk fel a figyelmet arra, hogy a harmonikusok jelenlétében csak fojtózott kondenzátortelegek alkalmazása javasolható, így ugyanis elkerülhető a harmonikus rezonancia kialakulása, és annak súlyos, pusztító következményei. A rezonancia kialakulását és a fojtózás hatását a 10. és a 11. ábrákon mutatjuk be.

1.3.4. A harmonikusok mérése

Amint a 3. ábrán bemutatott egyszerű időfüggvényből is látszik, az alapharmonikus jel 33%-os 3. harmonikus tartalma 33%-os csúcérték-növekedést okoz, ha ellenfázisban adódik össze a két jel (a 3. ábrán az alsó görbék). A már említett IT berendezések feszültséginverteres átalakítóinak hálózati áramában a 3. harmonikus áram fázishelyzete megfelel ez utóbbi esetnek azzal a különbséggel, hogy nem 33%, hanem 100-120% a 3. harmonikus tartalom. Az előbbi példánál maradva az eredő áramra a csúcérték/effektív érték $1,33/0,75 = 1,77$ szemben a szinusz-hullámra ismeretes 1,41 értékkel.

A valóságban akár 100% is lehet a harmadik harmonikus tartalom, amikor a csúcérték/effektív érték 2.

A fenti példákból látható, hogy az áram effektív érték nagyobb torzítás esetén csak igazi effektív értékmérő műszerrel (true RMS) mérhető kellő pontossággal. A mért érték 100%-os torzításnál 1,41-szeres lenne, ha effektív értékre skálázott Deprez-rendszerű műszerrel mérnénk).

A harmonikusok mérését az MSZ EN 61000-4-7 szabványnak megfelelő műszerrel kell elvégezni. A szabvány igen részletesen tárgyalja a mérőműszerrel és a mérési eljárással kapcsolatos elvárásokat. Alább összefoglaljuk a teljességre való törekvés nélkül a leglényegesebb ismérveit egy „A” osztályú digitális harmonikus és spektrum mérőműszernek.

- Áram- és feszültségbemenetek 0 Hz–20 kHz frekvenciaátviteli sávval,
- 0,5 % általános pontosság,
- 8 periódusnyi ablakozás Hann ablakfüggvénnyel,
- szinkron mintavétel,
- gyors Fourier transzformáció (FFT) szöghelyes harmonikusokkal legalább az 50. rendszámig,
- spektrumanalízis-lehetőség közbenső harmonikusok kiértékelésére,
- legalább 3 s tiszta mérésidő 10 s alatt,
- folyamatos regisztrációs lehetőség legalább 1 hétig,
- visszatükröződés elleni (antialiasing) szűrő.

Fentiekén túlmenően a harmonikus források méréssel történő azonosíthatósága érdekében – a szabványban már nem említett – fontos kérdés a mérések azonos idejűsége. Ez alatt az értjük, hogy sok csatornás egyidejű áram mérésére (a fogyasztói leágazások egy gyűjtősínről) és természetesen a gyűjtősínfeszültség mérésére van szükség ahhoz, hogy meg lehessen kísérelni a harmonikus források azonosítását olyan esetben is, amikor az azonosítandó harmonikus forrás nem domináns a környezetéhez képest, és a feszültség-torzulás létrehozásában a szerepe nem meghatározó. Ilyen esetekben a mérési eredmények megfelelő módszerrel történő kiértékelése szükséges, ami egyrészt megfelelő szoftvert igényel, másrészt a kiértékelő személy jártasságát a témában.

1.3.5. A harmonikusok által okozott problémák csökkentése

Az előző fejezetekben ismertettük a harmonikusok keletkezését, összegződését, terjedését, az általuk okozott problémákat és a mérési eljárást. Láttuk, hogy a harmonikusok által okozott problémák sokrétűek, és az áramszolgáltatónak és a fogyasztónak közös érdeke a harmonikus torzítás értékének csökkentése. Kérdés, hogy ki mit tehet ennek érdekében.

Fogyasztói beavatkozási lehetőségek

Kisfeszültségű fogyasztó esetében a beavatkozási lehetőségek a következők:

- A saját belső hálózatának átrendezése és megerősítése. Ez azt jelenti, hogy a csatlakozási ponttól külön hálózatot épít ki a nemlineáris fogyasztók részére, amelynek nullavezetőjét a fázisvezető kétszeres keresztmetszetével tervezi és egy másik hálózatot indít a csatlakozási ponttól a lineáris fogyasztók számára, amelyet a hagyományos elvek szerint tervezhet. Így a nemlineáris fogyasztók által a belső hálózat impedanciáján okozott feszültségtorzulás nem kerül a lineáris fogyasztók tápfeszültségére, csak a csatlakozási ponttól a táppontig tartó közös szakasz feszültségtorzulását észlelik, ami kb. 30%-kal kisebb, mint a teljes feszültségtorzulás lenne.
- A zérus sorrendű harmadik harmonikus kiszűrése elválasztótranszfor-

mátorral. A már említett földelt csillag/delta transzformátor alkalmazható arra, hogy egy nagyobb fogyasztói egység (pl. irodaház) nemlineáris fogyasztói által termelt harmadik harmonikusokat ne engedje a táphálózat felé (akár 0,4/0,4 kV-os is lehet ez az elválasztás).

- Passzív harmonikus szűrés. A passzív szűrő a hangolási frekvenciáján kis impedanciájú, ezért söntöli a táphálózatot a harmonikus áramra nézve, amelyre hangolt. Ez a megoldás csak ott javasolható, ahol biztosítható, hogy a szűrő ne terhelődjön túl az idegen nemlineáris fogyasztók által termelt harmonikus áramtól. Ilyen eset pl. amikor a fogyasztói csoportnak (irodaház, bevásárlóközpont) saját közép/kisfeszültségű betáplálása van. Ekkor a kisfeszültségű oldalon a betáplálási pontra telepíthető passzív szűrő, a körülmények (harmonikus áramok, középfeszültségű oldali harmonikus viszonyok, transzformátor-drop, meddőteljesítmény-viszonyok) pontos ismeretében.
- Aktív harmonikus szűrés. Az aktív harmonikus szűrés lényegében a fogyasztói áram szinuszosítása elektronikus módon. Általában impulzusszélesség modulált (PWM) inverter a teljesítményelektronikai rész, és mikroprocesszoros automatika állítja elő a szükséges áramot, amely lényegében a torzítás ellentettjét adja hozzá a torzított áramhoz és így eredőben közel szinuszos áramfelvételt biztosít. Az aktív szűrő alkalmazható ott is, ahol a passzív szűrés nem; például változó

frekvenciájú közbenső harmonikusok szűrésére (ilyen harmonikusai vannak pl. a változtatható fordulatszámú hajtásoknak, (ASD), aszinkron kaszkád hajtásnak, stb). Egyetlen hátránya, hogy jelenleg még igen költséges.

1.4. Gyors feszültségváltozások (villogás vagy flicker)

1.4.1. Definíció

Egyik megoldásnál sem lehet elhagyni a nullavezető keresztmetszetének növelését, mivel a szűrés mindig több fogyasztóra vonatkozik, nem gazdaságos kis teljesítményű egységeként szűrni.

Közép- és nagyfeszültségű nemlineáris fogyasztók esetében általában a passzív és aktív harmonikus szűrés, esetleg ezek kombinációja a lehetséges megoldás.

Áramszolgáltatói beavatkozási lehetőségek

Az áramszolgáltatónak a szabvány szerinti (MSZ EN 50160) minőségű feszültséget kell szolgáltatnia. Tekintettel arra, hogy a torzítást nem az áramszolgáltató hozza létre, az áramszolgáltató feladata az, hogy a megengedett torzítási szintet szétossza a fogyasztók között, kiosztva ezzel a szükséges szűrési feladatokat is a fogyasztóknak. Ennek ellenére az áramszolgáltató is beavatkozhat közvetlen módon. A feszültségtorzulás csökkenthető minden feszültség szinten (ha a rezonancia veszélye kizárt) a tápoldal zárlati teljesítményének növelésével vagy harmonikus szűréssel (aktív vagy passzív).

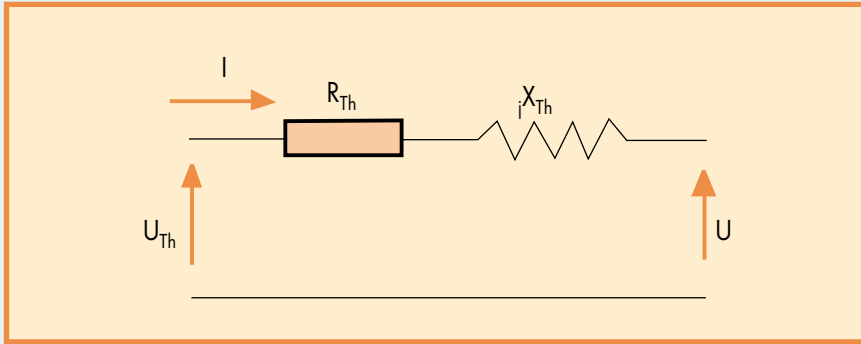
A közcélú elosztóhálózatra csatlakozó elektromos készülékeknek, így az izzólámpáknak is állandó effektív értékű feszültségre van szükségük a megfelelő működés érdekében. A változó teljesítményű fogyasztók azonban változó feszültségváltozást okoznak. A ciklikus gyors feszültségváltozás – más néven feszültség ingadozás – következménye az úgynevezett villogás (flicker) jelenség. Ez lényegében a feszültség gyors ingadozása által kiváltott időben ingadozó fényességű vagy színeképi eloszlású fényinger által létrehozott látásérzet-ingadozás hatásában jelentkezik, ami az embert zavarja munkája végzésében.

1.4.2. A villogás jelenség kialakulása

A villogást okozó feszültségváltozások jellemzőit a táphálózat Thevenin helyettesítő képe alapján tárgyaljuk (12. ábra)

A fogyasztó oldali feszültség (U) az ellenálláson és a reaktancián át folyó induktívnek feltételezett fogyasztói áram által okozott feszültségesés következtében kisebb, mint U_{Th} . A feszültségesést a hosszirányú feszültségeséssel közelítve:

$$U = |U_{Th}| - (I_W R_{Th} + I_M X_{Th}) =$$



12. ábra
A hálózat Thevenin képe

$$= |U_{Th}| - \frac{1}{3U^*} (PR_{Th} + QX_{Th})$$

(ahol U a valós tengely irányába esik).

Mint az egyenletből leolvasható, a feszültségváltozás a terhelés oldali P és Q változásától függ. Az időben változó terhelés által okozott feszültségváltozás a következőképpen fejezhető ki:

$$\begin{aligned} \delta U &\cong \frac{1}{3U^*} (R_{Th} \delta P + X_{Th} \delta Q) = \\ &= \Delta I_W R_{Th} + \Delta I_M X_{Th} = \delta(\Delta U) \end{aligned}$$

Konstans terhelés esetén $\delta P = 0$ és $\delta Q = 0$, így $\delta U = 0$ és ezért ΔU értéke időben változatlan. A feszültségváltozás definíciója látható a 13. ábrán.

A t_1 időpontbeli feszültség effektív értékének definíciója a következő:

$$U_F(t_1) = \sqrt{\frac{2}{T_F} \int_{t_1 - T_F/4}^{t_1 + T_F/4} U^2(t) dt}$$

ahol $T_F = 20\text{ms}$ és $\omega_F = 2\pi/T_F$. Jelöljük az U_F effektív értékek átlagát

$$U_{Fm} = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{T} \int_0^T U_F(t) dt \right] = U^*$$

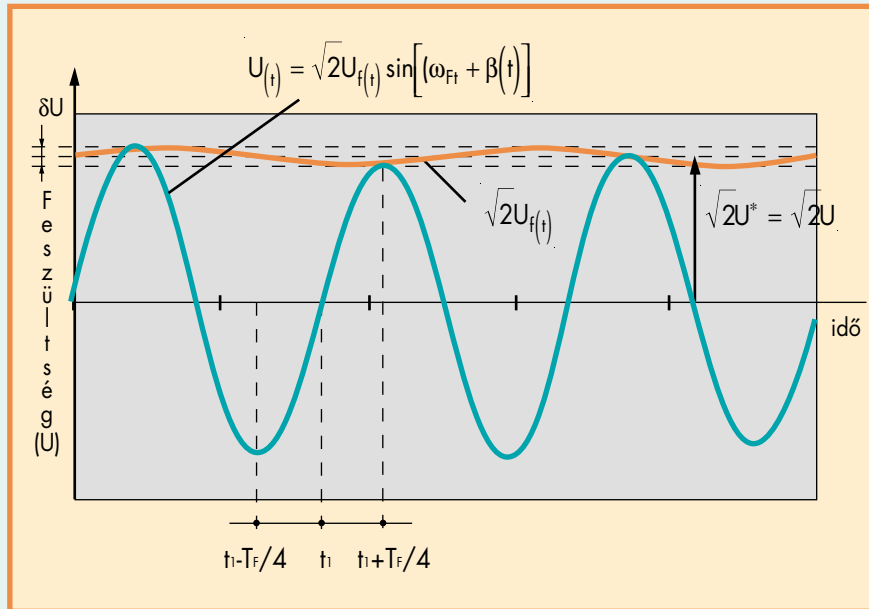
Az emberek nemcsak a feszültségváltozásra érzékenyek, hanem a feszültségváltozás frekvenciájára is (lásd a 22. ábra).

A villogást okozó hálózati folyamatok illetve fogyasztók az alábbiak:

- nagy terhelések ki- és bekapcsolása,
- nagy teljesítményű motorok indítása (különösen, ha ciklikus),
- ingadozó terhelések (pl. szabályozott nagy teljesítményű fűtések),
- hegesztőkészülékek,
- ívkemencék.

A következőkben egy ívkemence példáján keresztül bemutatjuk a feszültségváltozást előidéző folyamatot. Az ívkemence a PCC*-nél csatlakozik a közcélú hálózathoz, ahogy az a 14. áb-

* PCC: a kommunális csatlakozási pont (általában elszámolási mérés pontja) angol nevének (Point of Common Coupling) rövidítése



13. ábra
A villogás modulációs frekvenciájának és mértékének definíciója

rán látható. Így az összes, az ívkemence által keltett zavar áthalad a PCC-n.

Az ívkemence elé általában beiktatnak egy fojtót is a beolvasztási periódus idejére, hogy csökkentse a beolvasztás idején gyakran fellépő zárlati áramokat.

A továbbiakban tárgyalt zavar mértékét a PCC-re vonatkoztatjuk.

A feszültségesés számításához ismét vizsgáljuk meg a táphálózat Thevenin helyettesítő képét (15. ábra).

Jelöljük a hálózat és a transzformátor ellenállását r -rel, amelynek tipikus értéke az ívkemence feszültség szintjén

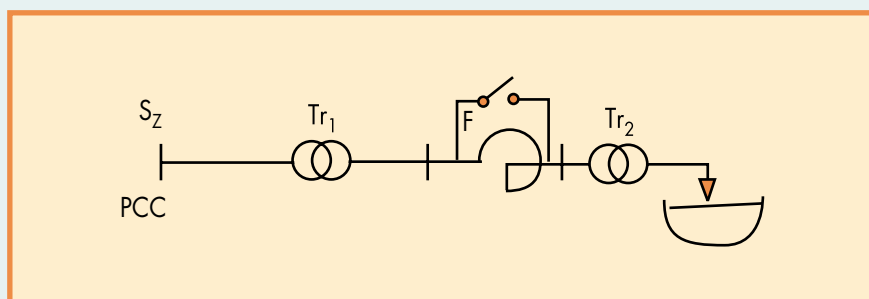
$$r = R_{Tr} + R_H \approx 0,15 \dots 0,4 \text{ m}\Omega$$

Továbbá jelöljük a hálózat és a transzformátor reaktanciáját x -szel, amelynek tipikus értéke az ívkemence feszültség szintjén:

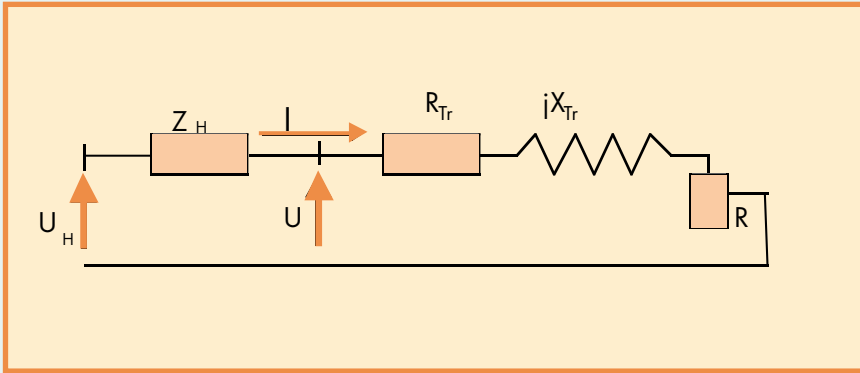
$$x = X_{Tr} + X_H \approx 3 \dots 6 \text{ m}\Omega$$

Az ívkemence változó ívellenállását jelöljük R -rel. Feltételezzük, hogy az U_H tápfeszültség a megfigyelési időszakban változatlan. A bevezetett jelölésekkel:

$$[(r + R) + jx] I = U_H$$



14. ábra
Az ívkemence tápellátásának egyszerűsített ábrája



15. ábra
Az ívkemence ellátás
Thevenin ekvivalense

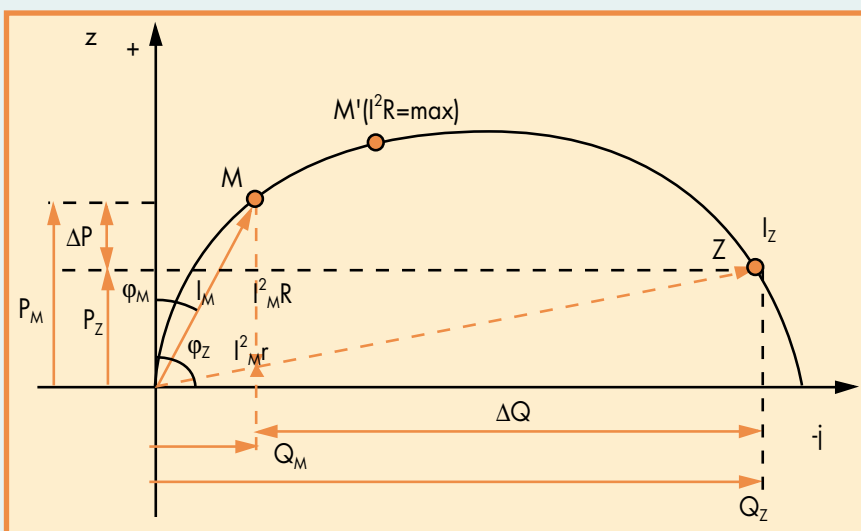
Az egyenletet átrendezve:

$$I - j \frac{r + R}{x} I = -j \frac{U_H}{x}$$

Normál üzemi körülmények között az ívkemence R ellenállása meghatároz egy munkapontot, amelyet a 16. ábrán M-mel jelöltünk. Az ívkemencében bekövetkező rövidzárlat esetén az ívkemence munkapontja Z-be kerül. Ekkor a hálózat impedanciája határozza meg a zárlati áramot:

$$I_z = \frac{U_H}{r + jx}$$

Ahogy I nő, úgy csökken a PCC-nél mérhető U feszültség a mögöttes hálózat impedanciájának következtében. Az R ívellenállás értékének változása így a PCC-nél mérhető feszültség ingadozását fogja okozni. A feszültségváltozás mértéke kifejezhető a terhelés oldali P és Q változással, azonban a két komponens szerepe a feszültségváltozás alakulásában korántsem azonos. Érdekes tehát a δU feszültségváltozást két részre bontani, amelyek közül az egyikért a P teljesítményváltozás, míg a másikkért a Q meddőteljesítményváltozás felelős. A PCC-n létrejövő feszültségváltozás:



16. ábra
Az ívkemence kör-
diagramja

$$\delta U \approx \frac{1}{3U^*} R_H \delta P + \frac{1}{3U^*} X_H \delta Q =$$

$$= \delta(\Delta U_W) + \delta(\Delta U_M)$$

itt $\delta(\Delta U_W)$ -vel a wattos áramváltozás, $\delta(\Delta U_M)$ -mel a meddőáram-változás által létrehozott hosszirányú feszültesítés komponenseket jelöltük. (A keresztirányú összetevőt elhanyagoltuk.) A wattos teljesítményváltozás okozta feszültesítés elhanyagolható a meddőteljesítmény-változás okozta feszültesítéssel szemben, mivel az egyes hálózati jellemzők között fennálló kapcsolat:

$$\begin{aligned} R_H/X_H &\approx 0,1 \\ \Delta I_W/\Delta I_M &\approx 0,3 \end{aligned}$$

Ezeket az arányokat felhasználva írható:

$$\delta U \approx \delta(\Delta U) \approx \Delta I_M X_H$$

Az előbbi arányokat felhasználva kiszá-

mitható a P és Q teljesítményváltozás aránya.

$$\Delta P \approx 0,3 \Delta Q$$

Továbbá, mivel

$$\begin{aligned} \Delta S &= \sqrt{\Delta Q^2 + \Delta P^2} \approx \sqrt{\Delta Q^2 + (0,3 \Delta Q)^2} = \\ &= 1,04 \Delta Q \end{aligned}$$

Ezt átrendezve kapjuk, hogy

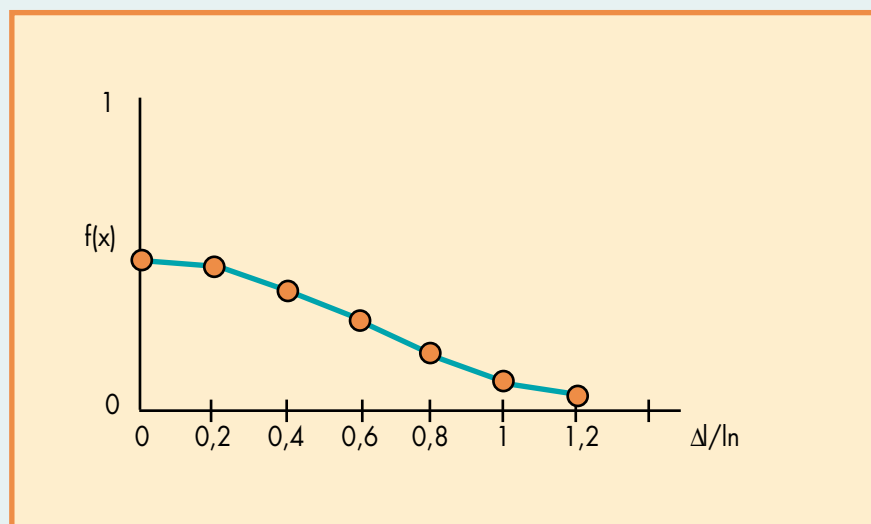
$$\Delta Q \approx 0,96 \Delta S$$

amit behelyettesítve a feszültségváltozás kiszámítására kapjuk, hogy

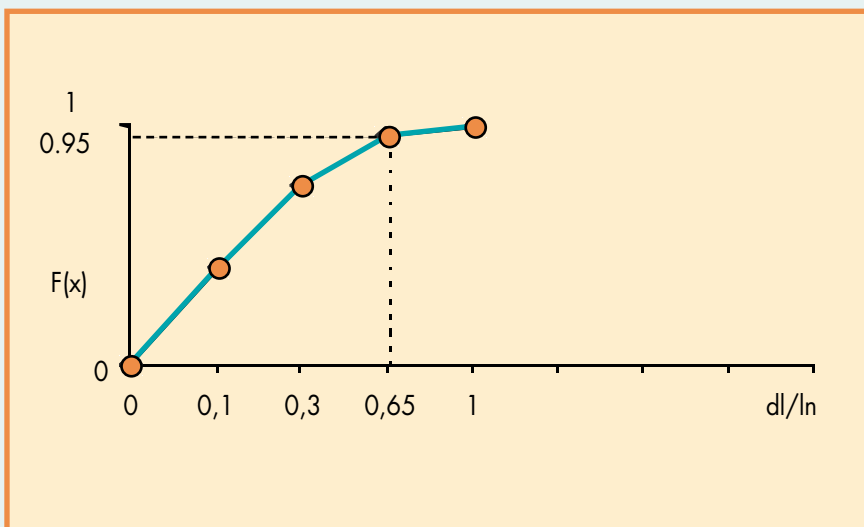
$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{\Delta Q}{S_z} \approx \frac{0,96 \Delta S}{S_z}$$

Az ívkemence beolvasztási periódusát illetően ismerjük az áramváltozás statisztikai jellemzőit, sűrűségfüggvényét és eloszlásfüggvényét, amelyek a 17. ábrán és a 18. ábrán láthatók.

Az eloszlásfüggvény 95%-os gyako-



17. ábra
Az áram
sűrűségfüggvénye



18. ábra
Az áram eloszlásfüggvénye

risághoz tartozó pontját figyelembe véve az áramváltozás mértékére a

$$\frac{\Delta I}{I_n} = 0,65$$

összefüggést kapjuk. Ebben az esetben a teljesítményváltozás mértéke

$$\frac{\Delta S}{S_n} = 0,65$$

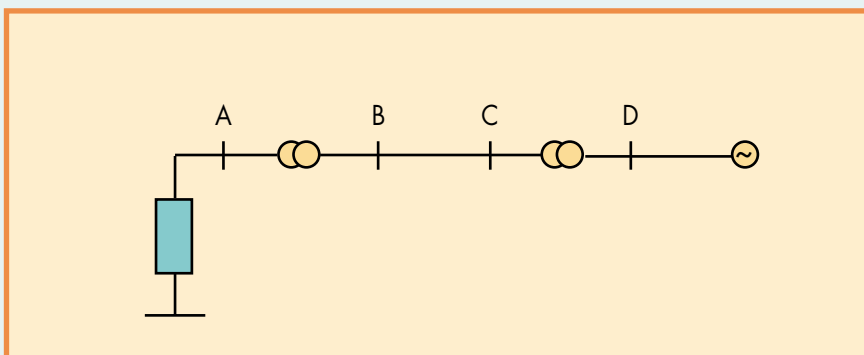
ahol S_n és I_n az ívkemence névleges teljesítménye és árama. Ezt felhasználva közelítő értéket kapunk a ívkemence által okozott 95%-os valószínűségű feszültségváltozásra.

$$\frac{\Delta U}{U} \approx 0,96 \cdot 0,65 \frac{S_n}{S_z} = 0,624 \frac{S_n}{S_z}$$

Fentiekhez hasonló gondolatmenettel követhető a kiefeszültségű hálózaton a fogyasztók bekapcsolási áramlökései által okozott feszültségváltozás.

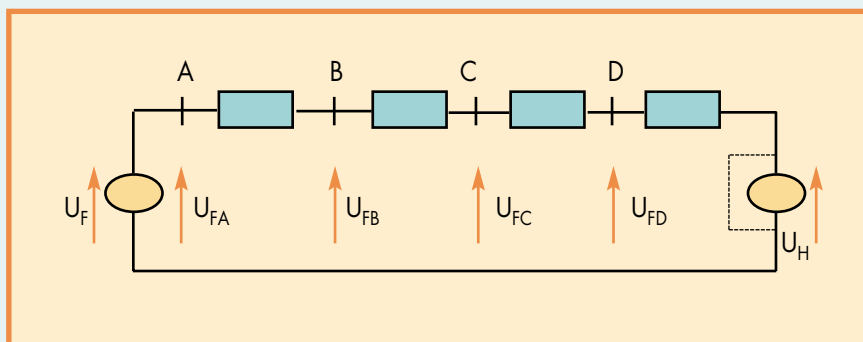
1.4.3. A villogás terjedése a hálózaton

A vizsgált hálózatot a 19. ábra mutatja. Először tekintsük azt az esetet, amikor a villogás forrása a kiefeszültségű hálózaton helyezkedik el. Más zavarforrást nem feltételezünk. A kiefeszültségű olda-



19. ábra
A táphálózat szimbólikus rajza

20. ábra
Villogásforrás a
kisfeszültségű oldalon



lon keletkező zavarok a közép- vagy nagyfeszültségű hálózat irányába terjednek a 20. ábra szerint.

Az U_H feszültség a hálózat Thevenin feszültsége, a B, C pontok a közép- vagy nagyfeszültségű oldalon helyezkednek el, míg az A pont a kisfeszültségű hálózati oldalt reprezentálja. Az U_F feszültség a kisfeszültségű oldal berendezései által keltett zavar. A zavar hatása a hálózati betáplálási oldalon kisebb mértékben jelenik meg, mivel az U_F feszültség leosztódik a táphálózat felé haladva a soros impedanciáknak megfelelően. Így az A, B, C gyűjtősíneken mérhető villogás szintek között a következő reláció áll fenn:

$$U_{FA} : U_{FB} : U_{FC} = \frac{1}{S_{ZA}} : \frac{1}{S_{ZB}} : \frac{1}{S_{ZC}}$$

ahol S_{ZA} , S_{ZB} és S_{ZC} a rövidzárlati teljesítményt jelöli a feszültségforrás (U_H) és az A, B és C gyűjtősínek között. Csak az A és B gyűjtősíneket figyelembe véve írható

$$\frac{U_{FA}}{U_{FB}} = \frac{S_Z^{(B)}}{S_Z^{(A)}}$$

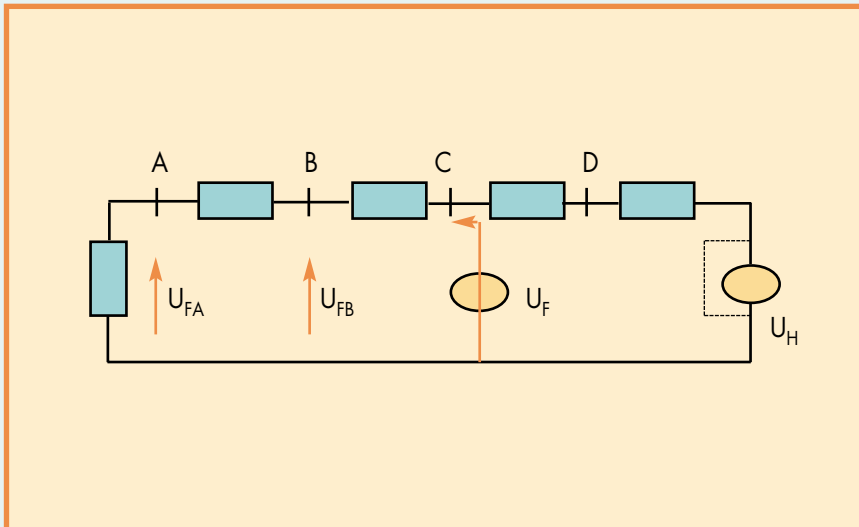
Mivel a villogás jelenség mértéke a feszültségváltozással arányos, ezért a villogás érzékelési szintek ennél a két mérési pontnál a következőképp alakulnak:

$$P_{st}^{(B)} = P_{st}^{(A)} \frac{S_Z^{(A)}}{S_Z^{(B)}}$$

Az összefüggést alkalmazhatjuk a többi gyűjtősínre a megfelelő indexek használatával. (A P_{st} definícióját az 1.4.5 fejezetben közöljük.) Az eredmény megerősíti azt, amire már korábban utaltunk, hogy a kisfeszültségű oldalon keltett zavarok csökkent mértékben befolyásolják a közép- vagy nagyfeszültségű oldalt, azaz hatásuk lokálisabb.

A közép- vagy nagyfeszültségű oldalon elhelyezkedő források tulajdonságai azonban korántsem ilyen kedvezőek. A hálózat helyettesítése erre az esetre a 21. ábrán látható.

Itt is U_H a hálózat Thevenin feszültsége, a B, C és D pontok mérési pontok a közép- vagy nagyfeszültségű oldalon, míg az A pont a kisfeszültségű oldalon helyezkedik el. Az U_F a közép- vagy nagyfeszültségű oldalon keletkezik, a C pontban. Mivel az A és C pontok közötti reaktan-



21. ábra
Villogásforrás
a közép- vagy
nagyfeszültségű
oldalon

cia sokkal kisebb, mint az A pont és a föld közötti, az U_F feszültség szinte változatlanul megjelenik az A pontban. Formálisan

$$P_{st}^{(A)} \approx P_{st}^{(B)} \approx P_{st}^{(C)}$$

A D pontban U_F hatása mérsékeltlen jelenik meg, éppen úgy, mint amikor a zavarforrás a kisfeszültségű oldalon volt található, mivel a C és D pontok közötti reaktancia majdnem egyenlő a D pont és a föld közötti reaktanciával. Így a következő eredményhez jutunk:

$$P_{st}^{(D)} = P_{st}^{(C)} \frac{S_z^{(C)}}{S_z^{(D)}}$$

1.4.4. A villogás zavaró hatása

A villogás zavaró hatását nehéz objektíven mérni. Az UIE/IEC által kifejlesztett, villogásmérésre használt módszer szimulálja a feszültségváltozás-fényforrás-

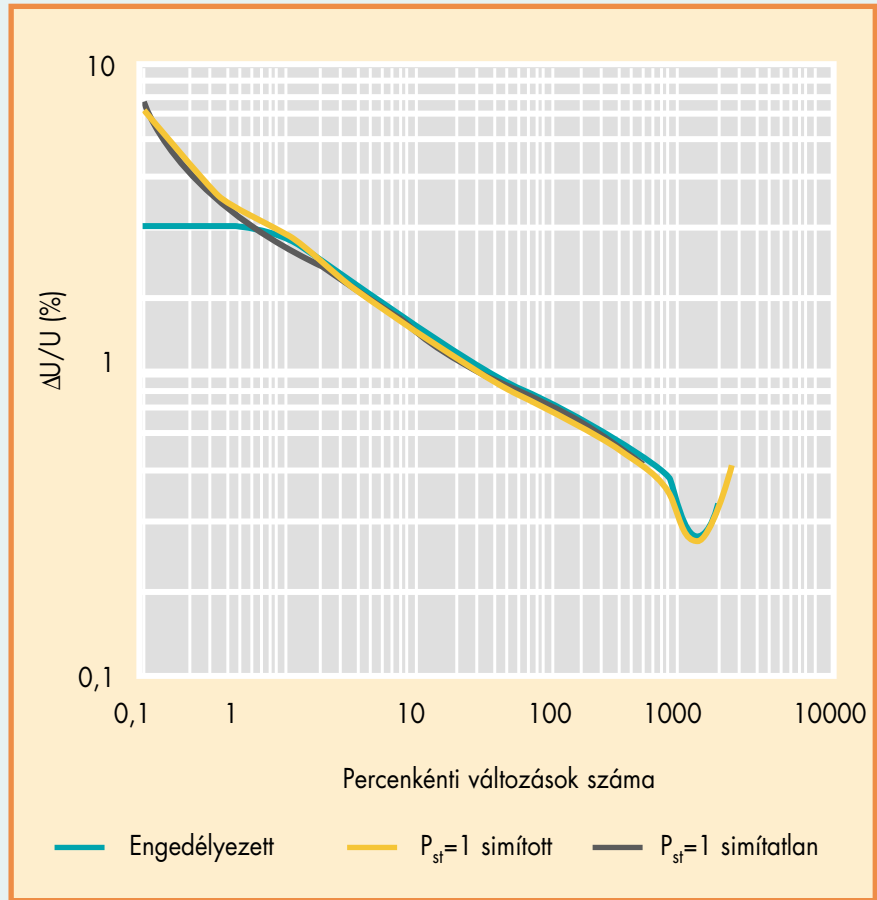
-szem-emberi agy érzékelési folyamatot és megbízhatóan jelzi egy megfigyelőnek bármilyen fajta villogásra adott reakcióját. A feszültségváltozásnak ugyanis két jellemzője van, amik együtt befolyásolják a villogás zavaró hatását: az amplitúdója és a frekvenciája (a 22. ábra a megengedett, és a szabványban szereplő határértékeket mutatja).

Amint látható, az ember a 8,8 Hz-es feszültségváltozásokra a legérzékenyebb. Az emberi érzékenység tulajdonságai megkövetelik egy speciális mérőműszer, a villogásmérő (flickermérő) használatát.

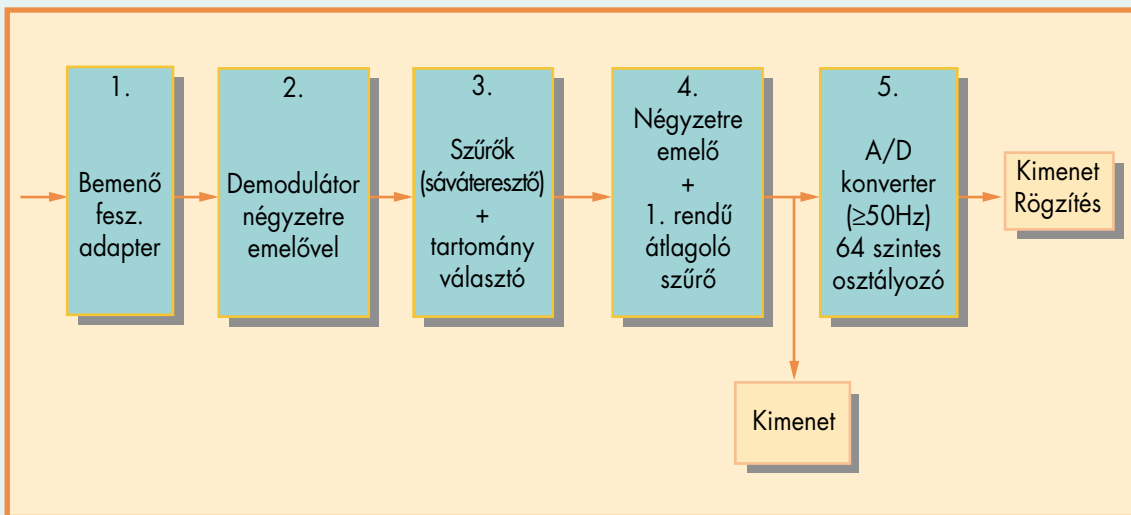
1.4.5. A mérési eljárás

A villogás mérésére alkalmazott műszer öt egységből állónak tekinthető, amelyek funkcionálisan elkülöníthetőek (23. ábra).

Az 1. egység szerepe a mérendő bemeneti feszültség fogadása és egy belső referenciaszint előállítás. Így a villogásmérések az aktuális hálózati fe-



22. ábra
Az IEC 555-3 által jóváhagyott maximális feszültségváltozás mérték



23. ábra

Az UIE flickermérő funkcionális diagramja

szültségtől függetleníthetők, és az eredményeket meg lehet adni százalékos formában.

A 2. egység szerepe a feszültségváltozás elkülönítése az 50 Hz-es jeltől, amit a bemenő jel négyzetre emelésével ér el.

A 3. egység két szűrő és egy mérési határ beállító egymásutánja, amelyek megelőzhetik vagy követhetik a szelektív szűrő áramkört. Az első szűrő eliminálja a demodulátor kimenet egyenkomponensét és kétszeres alapharmonikusát. A második alakítja ki a flickermérőnek a moduláló ingadozásra adott átviteli függvényét (a szűrő szimulálja egy izzószálas égő és az emberi látórendszer szinuszos feszültségváltozásokra adott frekvenciaválasztát). A 3. egység szűrőinek átviteli függvényét írja le a következő egyenlet:

$$F(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_2}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_3}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_4}\right)}$$

$$k = 1,74802$$

$$\lambda = 2\pi 4,05981$$

$$\omega_1 = 2\pi 9,15494$$

$$\omega_2 = 2\pi 2,27979$$

$$\omega_3 = 2\pi 1,22535$$

$$\omega_4 = 2\pi 21,9$$

A 4. egység egy négyzetre emelőből és egy elsőrendű aluláteresztő szűrőből áll. A lámpán, szemén és agyon keresztül történő emberi villogás érzékelés szimulációja a 2., 3. és 4. egység kombinációjával valósul meg. Tehát a 4. egység kimenete a pillanatnyi villogás-érzékelést adja. Az 5. egység magában

foglal egy mikroprocesszort, ami a villogásszintek on-line kiértékelését végzi, így lehetővé teszi a fontos kiértékelési eredmények közvetlen számítását. A 4. egység kimenetére alapozva megoldható az adatok off-line elemzése is, erről lesz szó a fejezet további részében.

A sztochasztikusan változó terhelések által okozott villogás jelenség véletlenszerűsége miatt fel kell tételeznünk, hogy a megfigyelési időszak alatt, amelynek megfelelően reprezentatívnak kell lennie időben, pillanatnyi értéke széles intervallumban és előreláthatatlan módon változhat. Ezért fontos, hogy ne csak a legnagyobb értékeket vizsgáljuk meg, hanem azt is, hogy egy megfigyelési időszak hány százalékában lépett túl a villogás mértéke egy bizonyos szintet. Annak érdekében, hogy minden esetet kezelni tudjunk, statisztikus módszerre van szükség. A függvény létrehozásához a következő lépéseket kell megtenni.

- először a 4. egység kimenetén mért pillanatnyi villogásérzet szinteket osztályozzuk értékük szerint,
- amikor letelik a megfigyelési időszak, kiszámoljuk az eloszlásfüggvényt.

A magányos csúcserőterek figyelmen kívül hagyása végett a megfigyelési időszak alatt mért maximális villogás értéket nem vesszük bele a számításba. A megfigyelési időszak hossza 1 és 10 perc. Az eloszlásfüggvény alapján az alábbi algoritmust definiálta a szabvány:

$$P_{st} = \sqrt{K_1 P_1 + K_2 P_2 + \dots + K_n P_n}$$

ahol P_{st} a kiszámítandó rövid idejű villogás mérték, míg K_1 -től K_n -ig súlyozófaktorok és $P_1, P_2 \dots P_n$ az eloszlásfüggvénynek egy bizonyos meghaladottsági gyakorisághoz tartozó szintjei. Az IEC által kifejlesztett algoritmusban 5 töréspontot adtak meg, amelyek a következők:

$P_{0,1}$ a szint, amelyet csak a megfigyelési időszak 0,1%-a halad meg

P_1 a szint, amelyet csak a megfigyelési időszak 1%-a halad meg

P_3 a szint, amelyet csak a megfigyelési időszak 3%-a halad meg

P_{10} a szint, amelyet csak a megfigyelési időszak 10%-a halad meg

P_{50} a szint, amelyet csak a megfigyelési időszak 50%-a halad meg

A megfelelő K együtthatók:

$K_{0,1}$ a 0,1% -os szinthez = 0,0314

K_1 az 1% -os szinthez = 0,0525

K_3 a 3% -os szinthez = 0,0657

K_{10} a 10% -os szinthez = 0,28

K_{50} az 50% -os szinthez = 0,08

Azon, működésük közben konstans zavart okozó terheléseknél, amelyeknek ki/be működési ciklusuk van, észreveték, hogy a ciklus hosszának kis változása megváltoztathatja a százalékos pontok egyikének értékét és így a számított villogásmértéket. Ennek elkerülésére a százalékok simított értékei használандók a számításhoz. Számításuk a következőképpen történik:

$$P_{50s} = (P_{30} + P_{50} + P_{80}) / 3$$

$$P_{10s} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}) / 5$$

$$P_{3s} = (P_{2,2} + P_3 + P_4) / 3$$

$$P_{1s} = (P_{0,7} + P_1 + P_{1,5}) / 3$$

További simításra nincs szükség, mivel a $P_{0,1}$ a flickermérőbe beépített 0,3 s-os időállandó miatt nem változhat ugrás-szerűen. Az algoritmus számára megváltoztatták az eredeti, a 22. ábrán látható határgörbét az 1-től 0,1 percenkénti változásszakaszon, kiterjesztették 7,5%-ra a 0,1-es percenkénti változásszintnél. Ugyancsak van egy kisebb eltérés (akár 10% is) az ábra jobb oldali részén a határgörbe és az egységnyi érzékelési szint között (l. 22. ábra, P_{st} simítatlan és simított értékek). A mérési módszer hibájának azonban minden esetben 5% alatt kell maradnia. Gyakorlati tesztek igazolták, hogy a fenti módszer korrekt eredményeket ad különböző hálózati zavarokra. A módszert úgy fejlesztették ki, hogy az emberek $P_{st} = 1$ szint mellett érezzék a villogást zavarónak.

Ugyan a rövid idejű villogásmérték a maga 10 perces hosszával alkalmas magányos zavarforrások mérésére, de bonyolultabb források, úgy mint több, véletlen módon működő terhelés együttese, valamint hosszabb és változó ciklusidejű terhelések mérésére is szükség van. A hosszú idejű villogásmérték-értékeket a megfigyelési időszak minden napjának minden 2 órájára ki kell számolni, 12 db egymást követő 10 perces P_{st} érték felhasználásával, amelyek az adott 2 órás intervallumból származnak a következő definíció szerint.

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sfi}^3}{12}}$$

ahol P_{sfi} a 10 percenként számított 10 perces érték. A MSZ EN 50160 szab-

vány szerint az így számolt hosszúidejű értékeknek normál üzemi körülmények között egy hét bármely szakaszában $P_{lt} \leq 1$ -nek kell lennie az idő 95%-ában.

Ez egyenértékű azzal, hogy az eloszlásfüggvény 95%-os értékéhez tartozó érték $P_{lt} \leq 1$.

2. Szabványelőírások

A hálózatra csatlakozó berendezések egy része okozza a hálózati zavarokat, más része csupán kénytelen ezeket a zavarokat elviselni. Azonnal belátható, hogy valamilyen rendező elv szükséges ahhoz, hogy a fentiekből átláthatatlan káosz ne keletkezzen, és hogy az áramszolgáltató is uralni tudja a hálózati zavarokat, valamint a fogyasztói berendezések gyártói is fel legyenek készülve arra, hogy milyen zavartűrő képességű berendezéseket gyártsanak. Ez a rendező elv a szabvány.

2.1. Harmonikusok

Az elektromágneses összeférhetőség (kompatibilitás) biztosítása azt jelenti, hogy az egyes berendezések elektromágneses zavarkibocsátását úgy kell korlátozni, hogy eredőjük ne zavarja az erre érzékeny berendezések rendeltetésszerű működését. Ily módon a szabványnak meg kellett határoznia azt az eredő zavar szintet, amelyet a készülégyártóknak kell figyelembe venni, hogy berendezéseiknek ilyen zavar szint mellett kell üzemelniük.

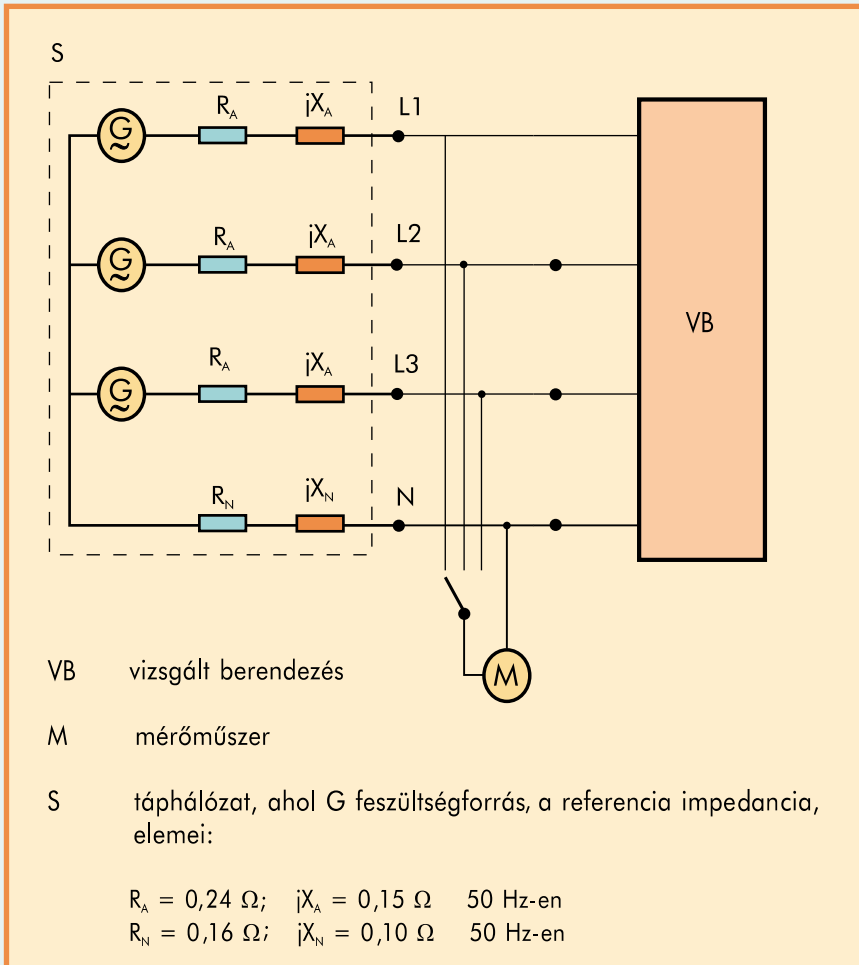
Ugyanakkor meg kellett állapítania az egyes zavart keltő berendezésekre megengedhető egyedi zavarási szinteket úgy, hogy az eredő zavar szint betartható legyen. (Nemcsak a zavarási szinteket, hanem az egyes berendezések vizsgálati módszereit és a vizs-

gálathoz alkalmazandó referencia táphálózatot is előírja a szabvány.)

A 24. ábrán a referencia táphálózatot adjuk meg. Itt kell megjegyezni, hogy a szabvány szerint a megadott referencia impedanciaértékek csak tájékoztatóak, és az áram- és feszültségtorzulás átszámíthatósága miatt fontos a betartása az egyedi készülékek ellenőrző méréseinél.

A harmonikus áram határokat 16 A-nél kisebb áramfelvételű berendezésekre a 2. táblázatban adjuk meg. A televízió vevőkészülékekre külön előírások vannak, amit a 3. táblázatban ismertetünk. (A személyi számítógép ugyanaz a kategória, mint a televízió.)

Az áramszolgáltató által a kisfeszültségű elosztóhálózatra garantált harmonikus feszültség százalékos értékeit a 4. táblázatban adjuk meg.



24. ábra
Referencia hálózat egyfázisú és háromfázisú fogyasztók vizsgálatára

Harmonikus rendszám (k)	Megengedhető áram (A)
Páratlan harmonikusok	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq k \leq 39$	$0,15 \cdot 15/k$
Páros harmonikusok	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq k \leq 40$	$0,23 \cdot 8/k$

2. táblázat

16 A-nél kisebb névleges áramú egyfázisú nemlineáris fogyasztók megengedett harmonikus áramai

Harmonikus rendszám (k)	Megengedhető áram (A)
Páratlan harmonikusok	
3	0,80
5	0,60
7	0,45
9	0,30
11	0,17
13	0,12
$15 \leq k \leq 39$	$0,10 \cdot 15/k$
Páros harmonikusok	
2	0,30
4	0,15
Egyenáram	0,05

3. táblázat

Televízió vevőkészülékek megengedett harmonikus áramai

Páratlan harmonikusok				páros felharmonikusok	
3-mal nem osztható		3-mal osztható		rendszám k	relatív feszültség %
rendszám k	relatív feszültség %	rendszám k	relatív feszültség %		
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

4. táblázat

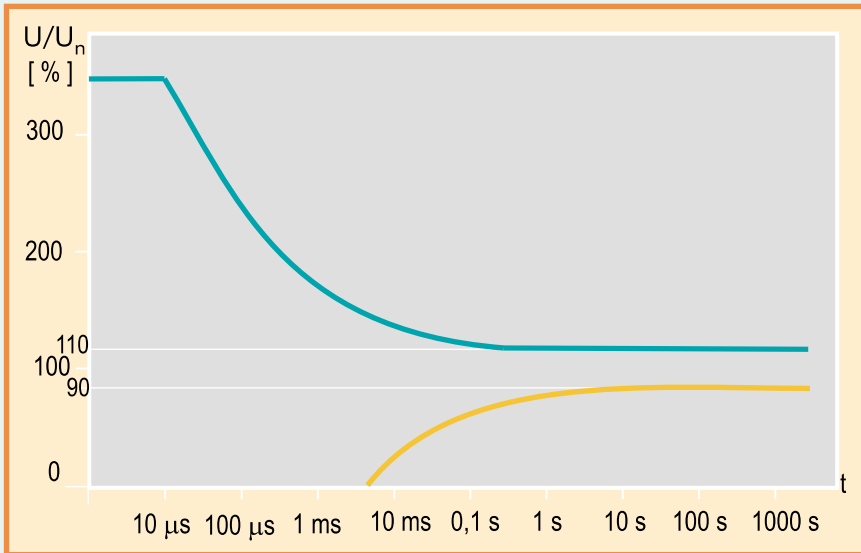
A kis- és középfeszültségű hálózaton megengedett felharmonikus torzulás értékei

2.2. Feszültségletörés, villogás

A feszültségletörést illetően több lépcsőt különböztetünk meg. Ha a feszültség a névleges érték 85%-a alá csökken 20-40 ms ideig, akkor a mágneskapcsolók öntartó körei bontják a mágneskapcsolók gerjesztését és azok kikapcsolnak.

Az információtechnológiai berendezések hibás működését okozzák a 25. ábrán folytonos vonallal jelölt terület fölötti (túlfeszültség) és alatti (feszültségletörés) feszültségek, ha a jelölt időtartamon át a fogyasztóra jutnak.

A kellő biztonság érdekében a nagyobb teljesítményű ipari fogyasztók bekap-



25. ábra
Az IT készülék hibátlan működésének sávja (CBEMA görbe)



26. ábra
A P_{st} a bekapcsolási áram időtartama függvényében, 5,32% feszültségváltásra

csolási áramlökése által előidézett feszültségletörésnek a névleges feszültség 95%-a alá nem szabad lecsökkennie. Ez az érték egyébként megfelel a villogási küszöbértékre elfogadott 5,32%-os feszültségváltozásnak. A villogás észlelhető értékére az 5,32%-ot adja meg az MSZ EN 61000-3-3 szabvány, de

megad egy ábrát is, hogyan változik a P_{st} a bekapcsolási áramlökés által okozott feszültségletörési időtartam függvényében (26. ábra). Az ábrán látható, hogy az 50-200 ms bekapcsolási időtartam által okozott villogásérték már közel van a biztonsággal megkövetelt $P_{st} \leq 0,8$ értékhez (az észlelési küszöb $P_{st} = 1$).

3. A szabványnak megfelelő készülékek alkalmazása által okozott problémák

Ebben a fejezetben egyszerű számpéldákon keresztül mutatjuk be, hogy a szabvány előírásainak megfelelő készülékek alkalmazása milyen problémákhoz vezethet, ha a fogyasztói hálózat vezeték-keresztmetszete a hagyományos méretezési elveknek megfelelően lett megválasztva.

Amint a 24. ábra referencia táphálózatánál láttuk, a négyvezetékes hálózatban a fázisvezetők és a nullavezető impedanciája eltérő. Az impedancia két részből áll. A valós részt a táphálózat ohmos ellenállása adja és lényegében a kisfeszültségű vezeték ohmos ellenállása a döntő. Az induktív részt a közép/kisfeszültségű transzformátor szórási induktivitása és a tápláló gerincvezeték induktivitása adják.

A fogyasztó bekapcsolása által okozott feszültségletörést illetően a teljes hálózati impedanciát kell figyelembe venni.

Feltételezve, hogy a referencia táphálózat helyettesítő impedanciája az elszámolási pontig terjedő hálózatot modellezi, az elszámolási ponttól a fogyasztó csatlakozási pontjáig a fogyasztói hálózatot még figyelembe kell venni ahhoz, hogy a fogyasztói hálózaton belüli feszültségviszonyokat modellezzük. Különválasztjuk a feszültségletörési és a harmonikus viszonyokat.

Számításainknál a nullavezető keresztmetszetét (így ellenállását is) a jelenlegi magyar szabványnak megfelelően a fázisvezetőével azonosnak feltételezzük.

Vizsgáljuk meg egy 800 W teljesítményű mikrohullámú sütő bekapcsolását! Az egyfázisú fogyasztóra a referencia hálózat impedanciája:

$$Z = Z_F + Z_N = 0,4 + j0,25 \Omega \Rightarrow$$

$$|Z| = 0,471 \Omega$$

A bekapcsolási áramcsúcs 38,75 A (l. a 27. ábrát) a névleges áram kb. 10-szerese.

$$\Delta U \approx |Z| I = 38,75 \cdot 0,471 = 18,28 \text{Vcsúcs}$$

$$\frac{\Delta U}{\sqrt{2}U_n} \approx 5,62\%$$

A bekapcsolási áram maximális értéke kb. 5 periódus alatt csökken le a

névtelen áram kétszeresére. A feszültségletörés értéke csupán a referencia-hálózatot figyelembe véve is meghaladja a szabvány szerint javasolt értéket. Vegyük még figyelembe az elszámolási ponttól (mérőóra) a fogyasztói berendezés csatlakozásáig a vezeték impedanciáját. Az impedanciát ebben az esetben elegendő csak a vezeték ohmos ellenállásával figyelembe venni.

Tételezzünk fel az elszámolási ponttól 2,5 mm² Cu vezetékkel 20 m hossz, 1,5 mm² Cu vezetékkel 15 m hossz a

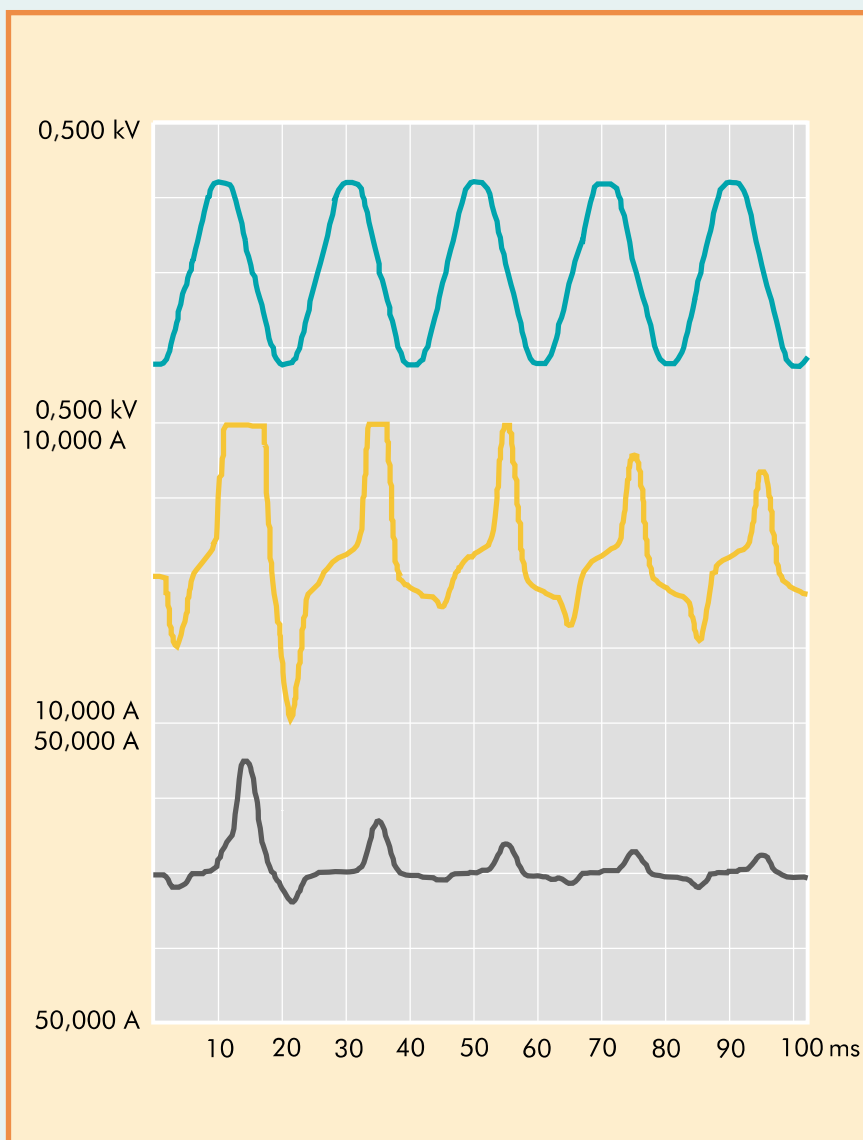
mikrohullámú sütő csatlakozásáig a 28. ábra szerint.

$$\Delta U_F = \left[2 \times 15 r(1,5 \text{ mm}^2) + 2 \times 20 r(2,5 \text{ mm}^2) \right] I$$

$$\Delta U_F \approx 19,9 \text{ V}(1,5 \text{ mm}^2) + 26,6 \text{ V}(2,5 \text{ mm}^2) =$$

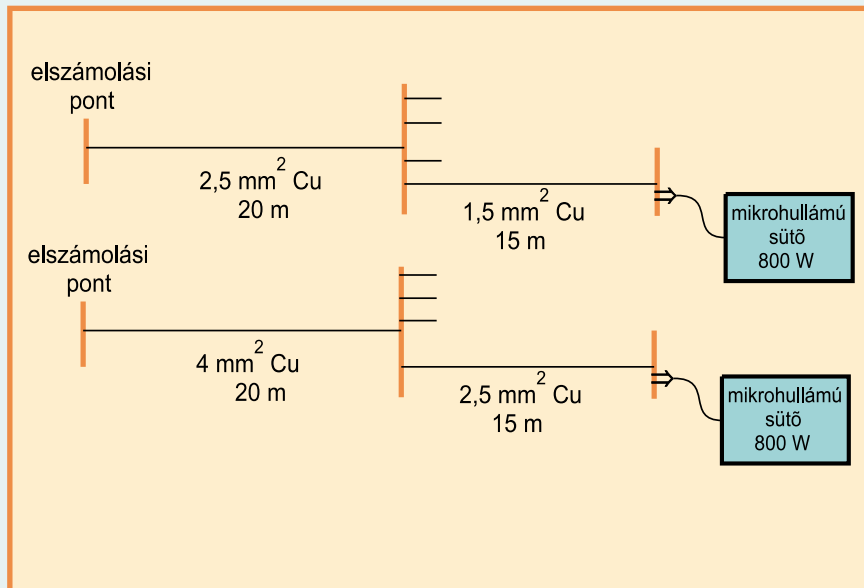
$$= 46,5 \text{ V (csúcstérték)}.$$

Látható, hogy a belső hálózaton keletkező feszültségletörés a hagyományos rézkeresztmetszet kiválasztás esetén a táphálózaton létrejövő feszült-



27. ábra
800 W-os
mikrohullámú
sütő bekapcsolása

28. ábra
Mikrohullámú sütő
hálózati csatlakozás
a) hagyományos
méretezés feszültség-
lelűzés bekapcsolás-
kor: $\Delta U \approx 14\%$
b) növelt rézkereszt-
metszet alkalmazásá-
val $\Delta U \approx 8\%$

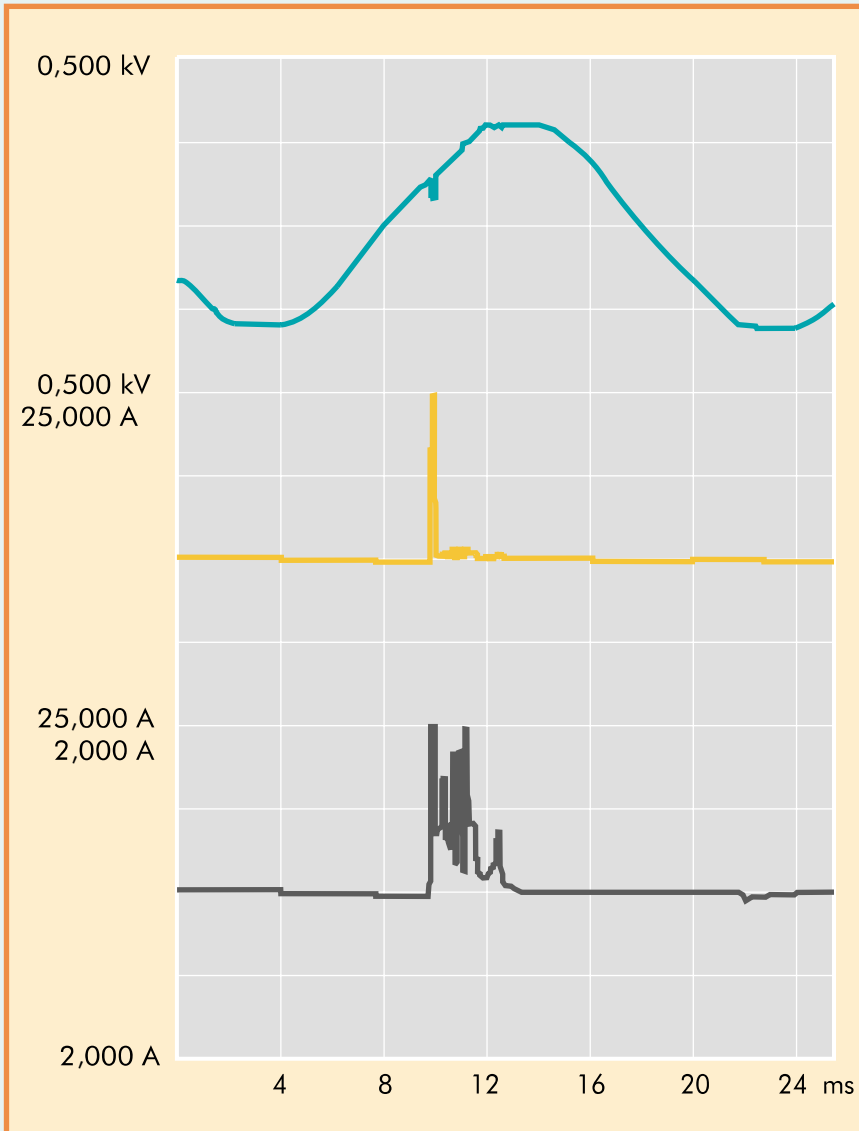


ségeses 2,5-szerese. Ilyen módon ér-
tethető, hogy a feszültségletörés zavaró
fényingadozással jár együtt, mivel a
relatív feszültségváltozás a megengedett-
hez közeli 5,62% helyett kb. 14% lesz.
A példában a vezeték-keresztmetszetet
az elszámolási ponttól 4 mm² Cu-ra, az
1,5 mm² Cu-vezetékét 2,5 mm² Cu-ra
cserélve, a feszültségváltozás 8% lesz.
A mikrohullámú sütő bekapcsolása csak
egy példa, amin keresztül bemutattuk a
fogyasztói visszahatás egyik formáját, a
villogást. A példából levonható az a
következtetés, hogy ez a fajta hálózati
visszahatás (a villogás bekapcsolási
áramlökés hatására) úgy csökkenthető,
ha vagy a bekapcsolási áramlökést
csökkentjük – ezt nyilván a berendezés
gyártója tehetné csak meg egy megfelelő
gyártmányfejlesztést követően –, vagy a
belső hálózat ellenállását csökkentjük –
ezt vezeték-keresztmetszet növelésével
lehet megvalósítani. Kisebb hatású, de
nem elhanyagolható a kompakt fény-
csövek bekapcsolási áramlökése által

okozott rövid idejű feszültségletörés,
amire a 29. ábra mutat példát.

Maradva a hálózati visszahatásnál, viz-
sgáljuk meg a harmonikusok hatását. A
szabvány szerinti megengedett áram-
értékeket figyelembe véve egy televízió
készülékre a 3. harmonikus áram $I_3 \leq$
0,8 A. A személyi számítógépre is
lényegében ez az érték vehető fel. A
következő példában vegyünk átlagosan
csak $I_3 = 0,5$ A-t. Amint az 1.3 pontban
részletesen kifejtettük, a 3. harmonikusok
gyakorlatilag azonos fázisban összeg-
ződnek, és még szimmetrikus három-
fázisú terhelés esetén (tökéletesen eloszt-
va az egyfázisú terhelés a három fázis-
ban) is a nullavezetőben folyik a három
fázisvezető 3. harmonikus áramainak
összege.

Így tehát megállapítható, hogy az összes
nemlineáris fogyasztó 3. harmonikus
árama a nullavezetőn keresztül záródik.
Ezek közül a TV és PC 3. harmonikus
áramok gyakorlatilag aritmetikailag
összegezhetőek.



29. ábra
20 W-os kompakt
fénycső bekapcsolási
árama

Először vizsgáljunk egy irodaépületet, ahol hat emeleten van emeletenként 20 iroda, irodánként 10 számítógép. Ez összesen 1200 db számítógép, amiből üzemeljen egyidejűleg 600 db. Ekkor a nullavezetőben folyó 3. harmonikus áram önmagában 300 A. Ugyanakkor a felszálló fázisvezetőket 250 A-re méretezték és a magyar tervezési előírás szerint a nullavezetőt is, nem gondolva a számítógépes terhelésre. Nyilvánvaló, hogy a nullavezető túlterhelődik, túlmelegszik, az állapot így nem tartható fenn.

A másik példa egy 600 lakásos lakóegyed, ahol minden lakásban van egy TV és egy számítógép. Ezek hét végén mind üzemelnek, ami 600 A 3. harmonikus jelent a nullavezetőben.

A fentiek a villamosenergia-minőség romlásán (nagy harmonikus feszültség-torzulás) kívül jelentős többletvesztéseget okoznak.

A fázisvezetőkben és a nullavezetőben külön-külön számolható a teljes harmonikus torzítási tényező az áramra

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \quad [\text{v.e.}]$$

A veszteségnövekedés a tisztán alapharmonikus veszteséghez képest a skin hatás elhanyagolásával az eredő (P_{ver}) és az alapharmonikus (P_{v1}) veszteségek hányadosa:

$$\frac{P_{\text{ver}}}{P_{v1}} = 1 + \text{THD}_I^2$$

A TV és PC áramokra a $\text{THDI} \approx 110\% = 1,1$ és $P_{\text{ver}} / P_{v1} = 2,21$.

A megoldás itt is kettős lehet. Az egyik lehetőség a fogyasztói áram harmonikus tartalmának csökkentése a már ismertetett módszerek valamelyikével (például irodaházakban központi szünetmentes inverterek telepítése és külön számítógépes hálózat létrehozása). A másik lehetőség a fázisvezetők kb 50%-os, a nullavezetők legalább 100%-os keresztmetszet-növelése az eredeti (harmonikusok nélküli áramra) tervezett keresztmetszethez képest.

4. Az új tervezői gyakorlat legfontosabb szempontjai

Összefoglalva az eddigieket, a megváltozott fogyasztói összetétel a tervezői-szerelői gyakorlatot megváltoztatta. Az új szempontok az alábbiak:

- Az igen nagy bekapcsolási áramlökések által okozott feszültségletöréseket csökkenteni kell. Megoldás: a vezeték-keresztmetszet növelése.
- A nemlineáris fogyasztói összetétel és a hálózat ismeretében ellenőrizni kell a rendszert a várható harmonikus problémákra, ezekre megoldást kell találni (szűrés, elválasztás, hálózat-szétválasztás).
- Nagy gondot kell fordítani a nullavezető megfelelő keresztmetszetének megválasztására (általában a fázisvezető keresztmetszetének kétszerese megfelelő).
- A kész rendszert célszerű mérésekkel ellenőrizni különböző várható üzemállapotokban.
- Gondosan kell megtervezni és kivitelezni a földelőrendszert, amelynek kérdéseivel jelen tanulmányban nem foglalkoztunk.