

VILLAMOS TRANZIENSEK IPARI LÉTESÍTMÉNYEKBEN

Kovács Attila 

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: attila.kovacs@zf.com

Somogyiné Molnár Judit 

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: judit.somogyine@uni-miskolc.hu

Jármai Károly 

egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet,
Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros, e-mail: karoly.jarmai@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A XXI. század egyik legnagyobb kihívása az automatizált, robotizált gyártásban használt vezérlő, szabályozó és adattároló egységeinknek a megóvása a villamos hálózati zavarok következményeitől. A prevencióhoz azonban elengedhetetlen a sokszor sztochasztikusan jelentkező hibajelenségek okainak pontos beazonosítása. Gyakran még magát a hibajelenséget is nehéz detektálni, hiszen sokszor a klasszikus megközelítéssel nem tudjuk azt megmagyarázni, így már csak a következményeit érezhetjük. Legtöbbször a pillanatnyi, rövid idejű letörések okát az áramszolgáltató vagy az ipari létesítmény belső villamos hálózat feszültség kimaradásaként azonosítják be, ami akár téves következtetés is lehet. A megfoghatatlan feszültség letörések egyik lehetséges oka lehet a káros villamos hálózati felharmonikusok jelenléte. A cikkben, felhasználva a releváns tudományos szakirodalmat is gyakorlati tapasztalatok, hálózat analízis eredmények, valamint a lehetséges detektálási és megelőzési módszerek kerülnek bemutatásra.

Kulcsszavak: villamos tranziensek, harmonikus torzítás, villamos hálózati zavarok, feszültség letörések, torlófójtós fázisjavítás, teljes harmonikus torzítás (THD)

Abstract

One of the greatest challenges of the 21st century is to protect our control, regulation and data storage units used in automated, robotic manufacturing from the consequences of power grid failures. However, for prevention it is essential to accurately identify the causes of these failures that often appear stochastically. Many times, it is difficult to detect even the fault phenomenon itself, since often it cannot be explained using classical approaches and only its consequences can be felt. In most cases, the cause of momentary, short-term outages is identified as a voltage failure in the internal electrical network of the electricity supplier or industrial installation, which can be a wrong conclusion. One possible cause of intangible voltage sags may be the presence of harmful power grid harmonics. In the paper using the relevant scientific literature practical experiences, network analysis results, as well as possible detection and prevention methods are presented with.

Keywords: electrical transient, harmonic distortion, electrical network disturbances, voltage dropouts, choke phase correction, total harmonics distortion (THD)

1. Bevezetés

Napjainkban szinte nem léteznek olyan mechanikai mozgást, villamosenergia-átalakítást végző berendezések, melyekben nincs elektronikus teljesítményszabályozás. A tömeges elterjedésük miatt magas, sőt akár elsődleges prioritású veszélyforrásként kell velük foglalkoznunk. Az EIR (Energia Irányítás Rendszer ISO 50001) szabvány is megköveteli bizonyos teljesítmény határok felett a teljesítmény szabályozott hajtás alkalmazását, de a villamosenergia-átalakító berendezések közé sorolhatóak a különböző indukciós hevítő berendezések is. Ezeknek a nem lineáris berendezéseknek villamos jelalak átalakító visszahatása van. Az eltorzult jelalakok okozta lehetséges elméleti hibák ismertek, a normál körülmények között még tiszta szinuszos formában lévő áram- és feszültségcsinusz hullámok a harmonikusokat tartalmazó rendszerekben torzulnak. A hullámalak torzulása által okozott problémák általában a következők: tápfeszültség hullámalak torzulása, magas frekvenciákon rezonancia kockázatok a rendszerekben, érzékeny elektronikai eszközök, PLC és CNC eszközök meghibásodása, hibás működések a védelmi és vezérlőrendszerekben, túlmelegedés elektromos motorokban és transzformátorokban. A probléma gyakorisága és nagysága olyan tényezőktől függ, mint az adott létesítmény típusa, a létesítmény működési feszültségcsinusz, a terhelés típusa/intenzitása és a hálózat rövidzárlati teljesítménye (Aktif, 2021).

Gyakorlati tapasztalatok alapján elmondható, hogy villamosenergia szolgáltatói körökben nehéz elismertetni, hogy a hálózaton a felharmonikusok nagysága már káros. Sajnos még manapság is csak a nagy fogyasztók esetében végez a szolgáltató direkt hálózatvizit és folyamatos a vita, hogy mi az, amit az ipari létesítmény állít elő és mi az, ami a szolgáltató hálózatról érkezik a fogyasztóhoz. A vállalatok ritkán végzik el a belső villamos hálózatuk ellenőrzését és ezek az analízisek legtöbbször csak az „áramszünetek” detektálására, dokumentálására irányulnak. A kis teljesítmény felvételű berendezések közvetlen vizsgálata, úgymint az irodai eszközök, a termelésben használt irányítástechnikai eszközök, vezérlések, fényforrások, fényerősség szabályozók legtöbbször kimaradnak az ellenőrzésből. Napjaink legnagyobb harmonikus zavarforrásai (Caicedo et al., 2017) az elektronikus teljesítmény szabályozások, a LED fényforrások (VLED.hu, 2019; Uddin et al., 2013), a frekvencia váltók az egyenáramú és aszinkron motorokhoz, de nem tévedek nagyot, ha az élvonalba sorolom a Plug-In hibrid és tisztán elektromos hajtású gépjárművek töltőberendezéseit is (Wang et al., 2019).

2. Harmonikus zavarforrások

Mik azok a felharmonikusok? (Sallam et al., 2019) Bármely torzított, nem szinuszos periodikus függvény elemezhető a Fourier-tétel segítségével és ábrázolhatjuk a következő összetevőkből álló kifejezések összegeként:

- adott esetben az egyenáramú komponens,
- egy szinuszos kifejezés az alapprofrekvencián,
- az alapprofrekvencia többszörösének frekvenciájával rendelkező szinuszos tagok (felharmonikusok).

Az n -edik rendű harmonikus (általában n -edik harmonikusnak nevezik) a jelben az a szinuszos komponens, amelynek frekvenciája az alapprofrekvencia n -szerese.

A periodikus függvény harmonikus kiterjesztésének egyenlete a következő:

$$Y_t = Y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_{\max, n} \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (1)$$

ahol,

Y_0 = egyenáramú komponens,

$Y_{\max,n}$ = az n-edik harmonikus maximális értéke (amplitúdója),

ω = körfrekvencia (az alapkfrekvencia 2π -szerese),

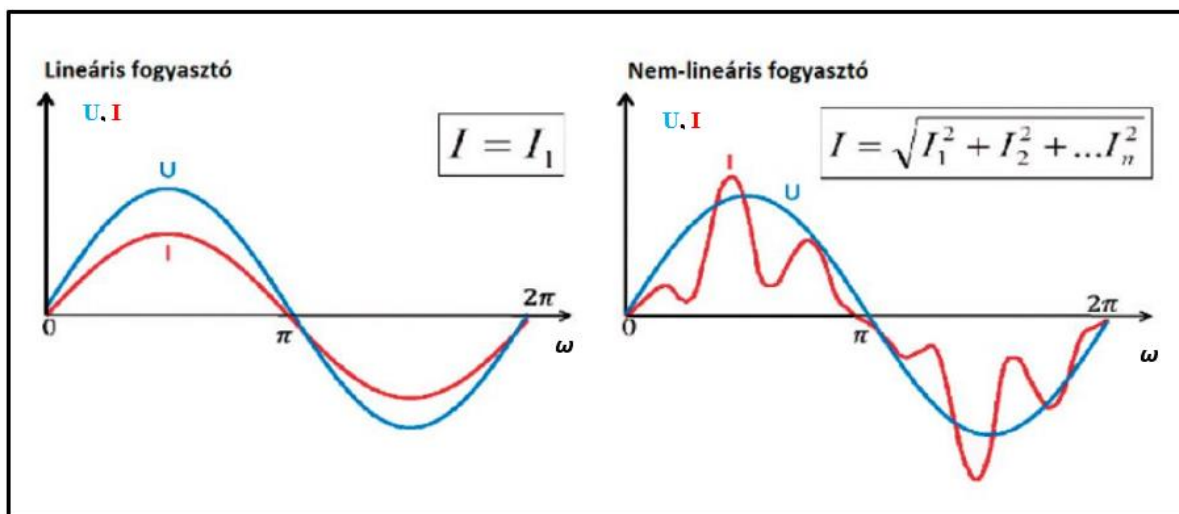
Φ_n = a harmonikus komponens kezdő fázisa $t=0$ időben.

Vagyis egy torzított periodikus jelnek van egy alapkfrekvenciás, mondjuk 50 Hz-es alapkkomponense plusz egy 100 Hz-es második harmonikus komponense, plusz egy harmadik 150 Hz-es harmonikus komponense és így tovább.

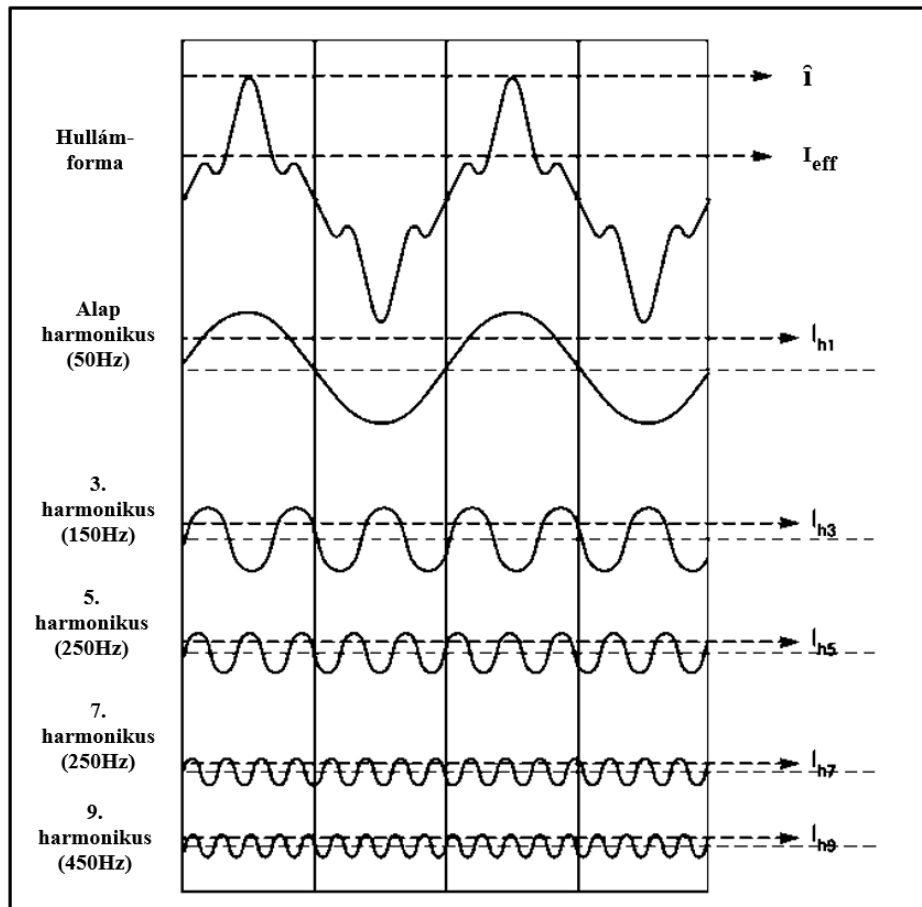
A feszültség hullámformájának harmonikus torzítása mind a villamosenergia-elosztó hálózatokat, mind a fogyasztói berendezéseket érinti. A harmonikus torzítási szintek az utóbbi években gyorsan nőttek a villamosenergia hálózatokban, elsősorban a nemlineáris félvezető eszközök egyre szélesebb körű alkalmazása miatt, amelyek a harmonikus torzítás nagy részét okozzák.

Az 1. ábrán láthatjuk egy lineáris és egy nem lineáris fogyasztó összehasonlítását a jelalakok alapján. A bal oldali ábrán látható, hogy a lineáris fogyasztók árama arányos a rájuk kapcsolt feszültséggel, azzal megegyező jelalakot vesz fel, míg a jobb oldali ábra a nem lineáris fogyasztók esetét mutatja, ahol az eredő áram effektív érték, az egyes harmonikus áramok négyzetösszege. (Kiss, 2020).

Ha a frekvenciatartományban elemezzük az áramukat (a jel spektrumát Fourier transzformáció segítségével kapjuk meg) láthatjuk, hogy a hálózati alapharmonikuson (50 Hz) kívül, annak az egész számú többszörösei (100, 150, 200, 250 Hz stb.) is megtalálhatóak. A hálózati feszültség felharmonikus torzítása a nemlineáris fogyasztók felharmonikus áramai miatt jön létre. Ezek az áramok átfolynak a villamos hálózat impedanciáin, felharmonikus feszültségeket létrehozva. Ezt a hatást nevezzük a fogyasztók felharmonikus visszahatásának.



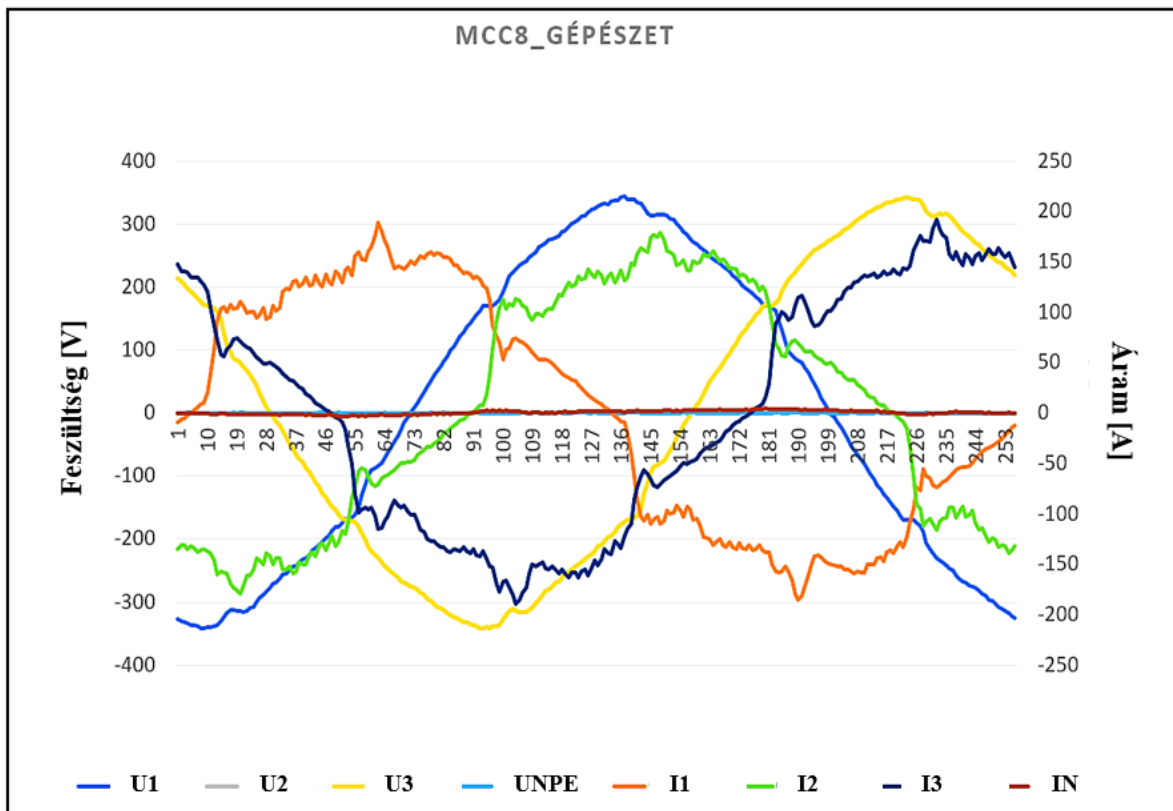
1. ábra. Lineáris (balra) és nemlineáris (nemlineáris) fogyasztók összehasonlítása jelalakok alapján (Kiss, 2020).



2. ábra. Torzított áramhullámforma és összetevői (Sallam et al., 2019).

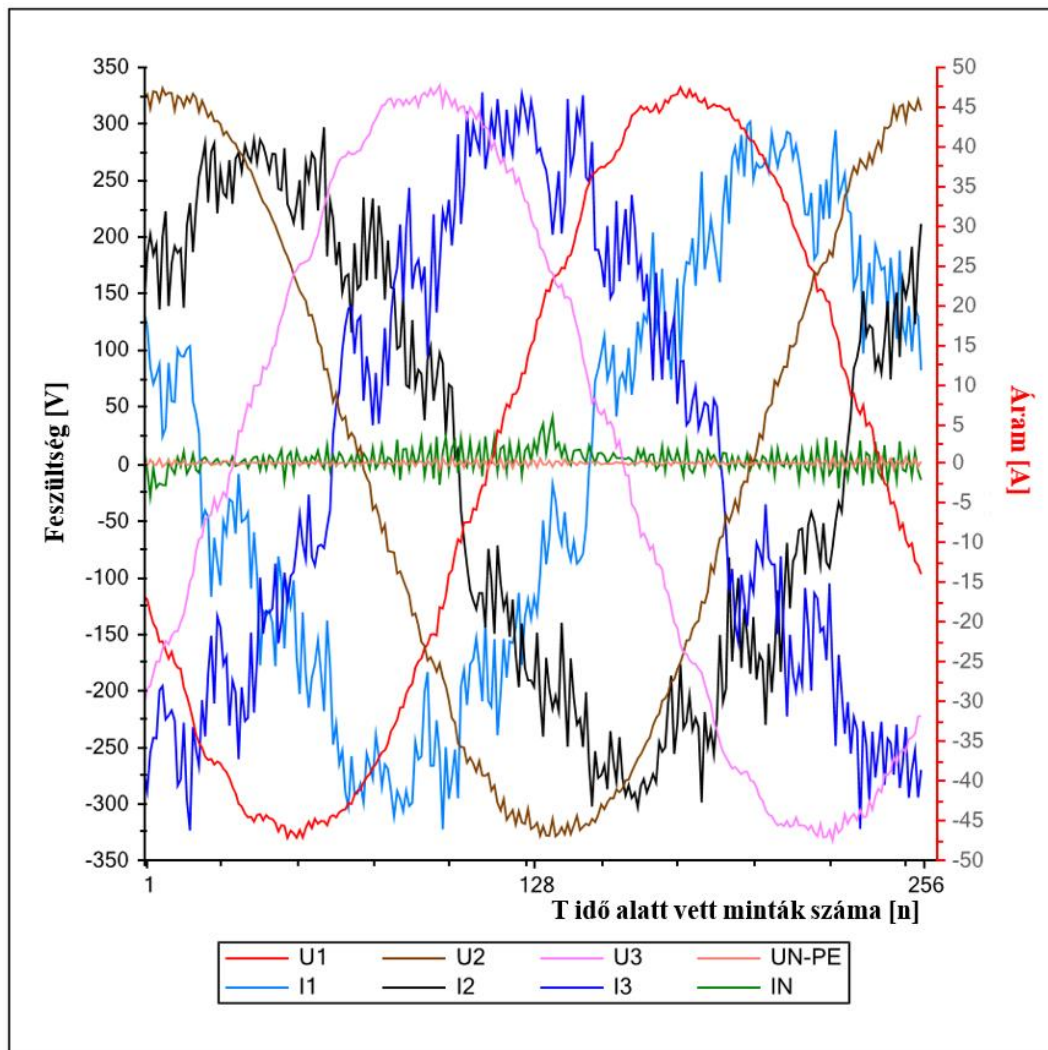
2.1. Hálózat analízis

A 2. ábrán látható, hogy a teljes hullámalak harmonikus torzítást szenvedett, melynek életszerűségét megerősíti a 3. ábrán látható, a saját mérés alapján készült hullámforma diagram is. Ez az hullámalak az alapszínusz komponensből és az egymásra helyezett szintén szinuszos harmonikusok összegéből állítható elő. Ez a jelalak saját hálózatanalízis mérés eredménye, amely összhangban van a szakirodalmi mérési eredményekkel. Megmutatja a gyakorlatban is, hogy hogyan torzul el az áram-hullámforma a felharmonikusok miatt az épületgépészeti helyiségben, ahol számottevő a villamos motorok elektronikus fordulatszám szabályozása és a szabályozó elektronikus berendezések tápellátásához szükséges kapcsolóüzemű tápegységek alkalmazása.



3. *ábra.* Torzított áramhullámforma és összetevői saját mérés alapján (a vízszintes tengely a t idő tengely, a számok az egy T periódus idő alatt vett minták sorszámai).

Egy másik mérés hullámformája látható a következő, 4. ábrán. Ezen a mérési ponton már sokkal nagyobb a harmonikus szennyezettség, mint az előző esetben, ezért a hullámforma is sokkal nagyobb torzulást szenved el. Észrevehetjük, hogy a nullvezető árama is igen magas, mind pozitív, mind negatív irányban, holott ennek ideális esetben nullának kellene lennie. Ez túlterhelést okoz a vezetékben, a transzformátorokban, ami meghibásodásokhoz vezethet. Később tárgyalásra kerül a fentiek lehetséges következményeit a villamos hálózaton üzemeltetett berendezések tápforrásaira.

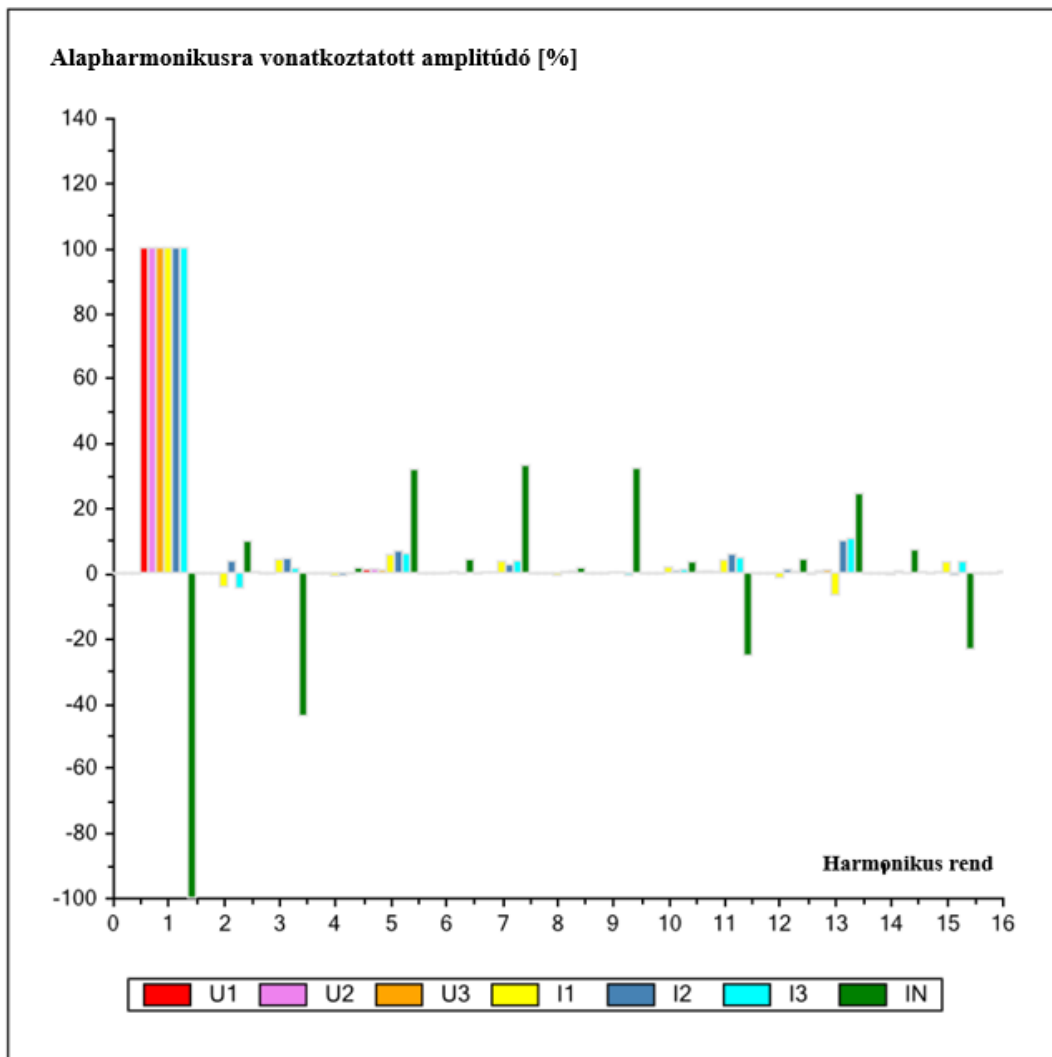


4. ábra. Gépészet torzított áramhullámforma és összetevői saját mérés alapján (a vízszintes tengely a t idő tengely, a számok az egy T periódus idő alatt vett minták sorszámjai).

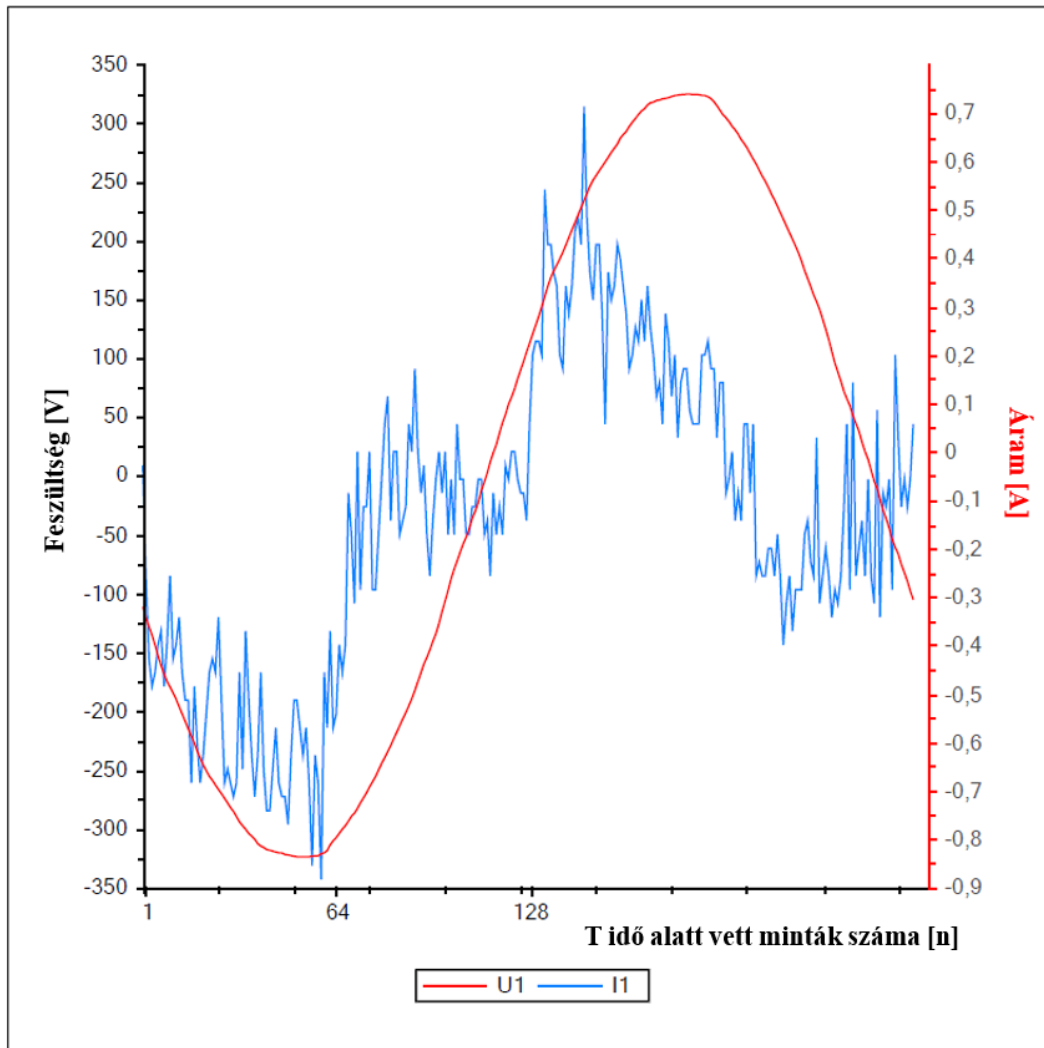
Az 5. ábrán látható a 4. ábra jelalakjainak a spektruma, melyen észrevehetjük a nullavezető váltakozó áramának amplitúdóját is. Az ábrán a vízszintes tengelyen a sorszámok az alapharmonikus (50 Hz) egészszámú n -edik többszöröseit jelölik, míg a függőleges tengelyen az alapharmonikusra vonatkoztatott amplitúdót láthatjuk. A nullavezető áramát az aszimmetrikus terhelés, az alapharmonikusra vonatkoztatott negatív amplitúdó a 180° -os fázis-eltolódás okozza.

A villamosenergia elosztó hálózatok az esetek többségében TN (Three-phase Neutral system) háromfázisú nullázott rendszerűek, ebben a rendszerben a transzformátor szekunder tekercsei csillagba vannak kapcsolva és a tekercsek csillag pontját leföldelik, majd erre a pontra kötik a nullavezetőt. A fázisfeszültségekben megtalálható az összes harmonikus, emiatt a fázis és a vonali áramokban is megjelennek a harmonikusok. A nullavezető áramát a fázisáramok összege adja. Ezen áram effektív értéke a zérus sorrendű áramok négyzetösszegeinek négyzetgyöke lesz. Ez az áram a nullavezetőben

többet terhelést okoz a szimmetrikusan kapcsolt, nem lineáris terhelések esetén, melynek nagysága elérheti a fázisvezető áramának a 2-3 szorosát is. Ha a hálózat tervezése során nem számolunk ezzel az árammal és nem vesszük figyelembe a nullavezető felharmonikusok miatti áramát - ami az egyes vezeték szakaszokon a feszültségesés miatt potenciál eltolódásokat okoz, az elektronikus berendezések működésében komoly zavarokat okozhat.

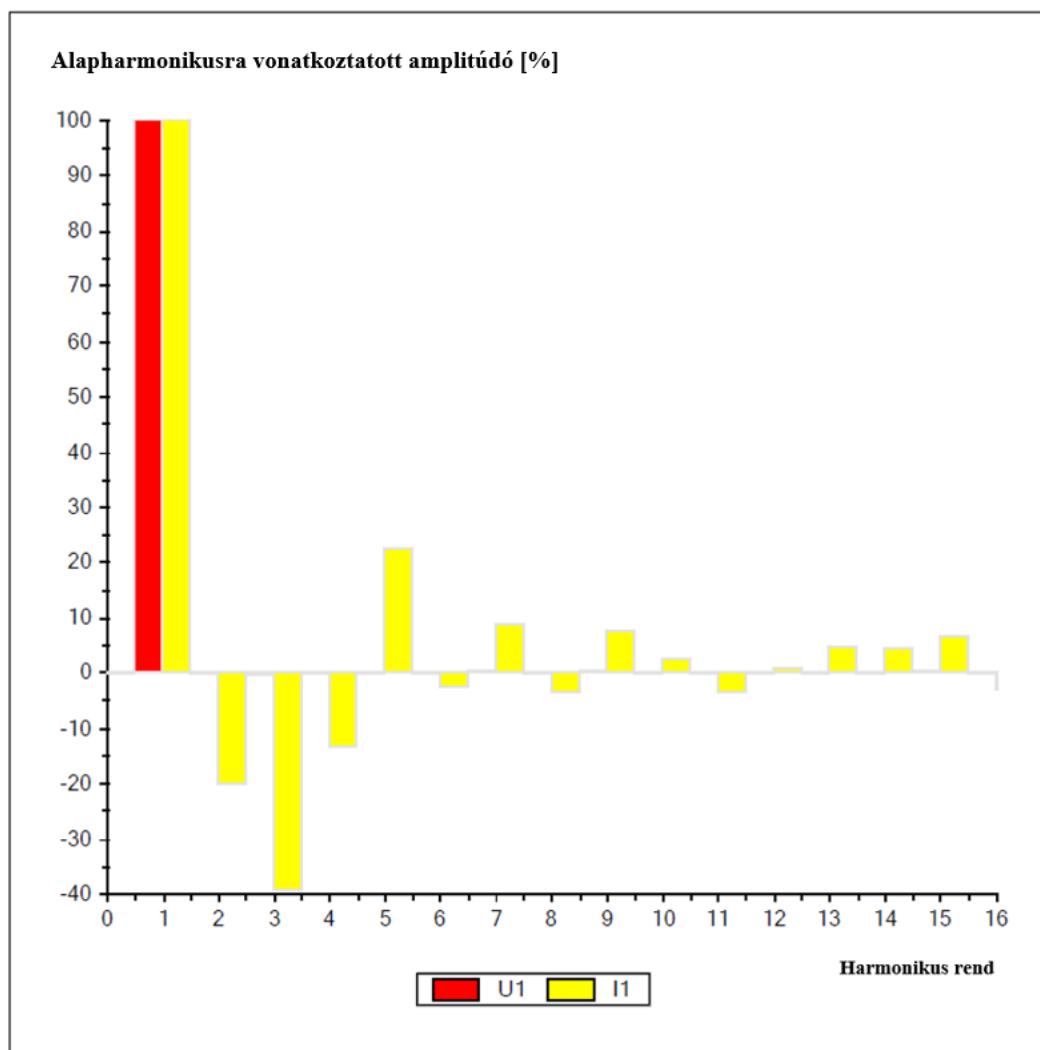


5. ábra. Gépészet torzított áramhullámforma és összetevői saját mérés alapján.



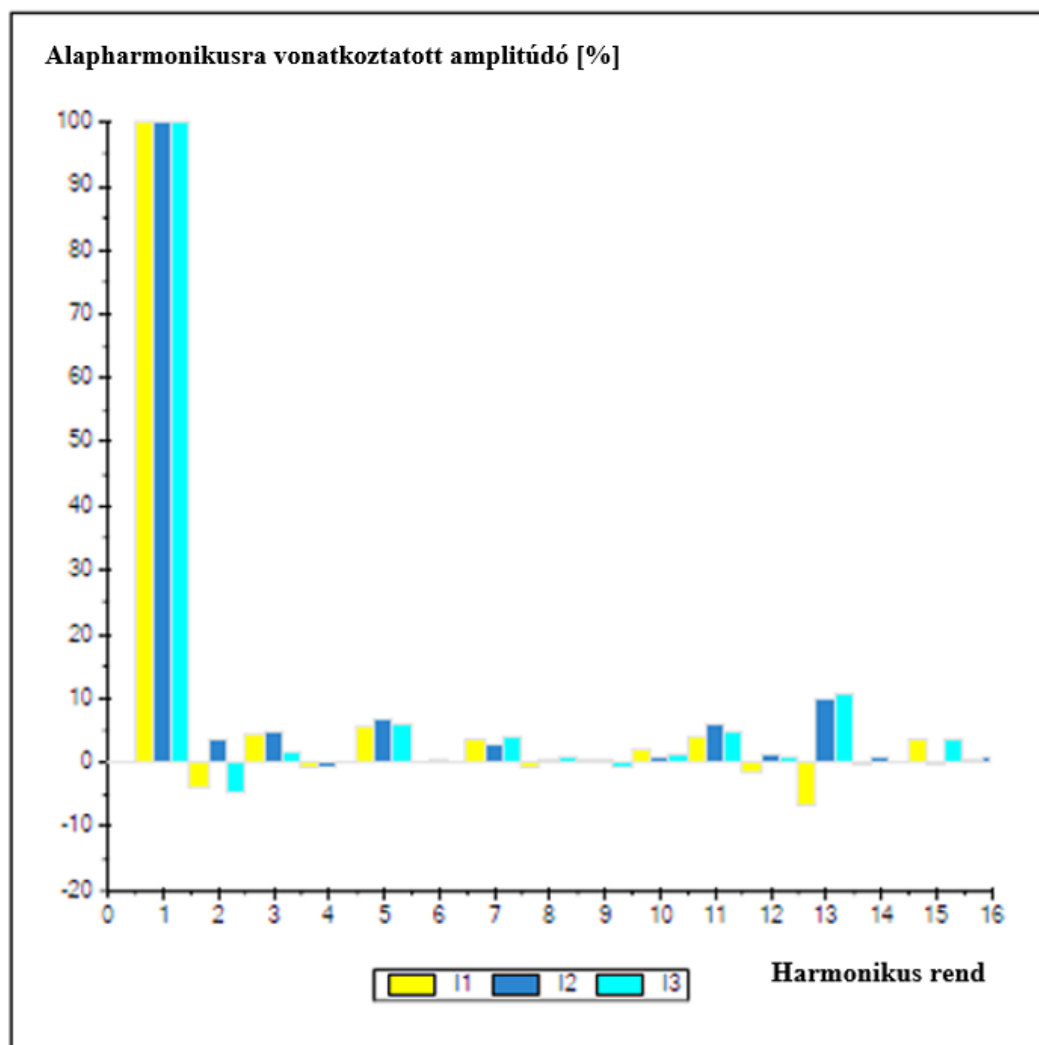
6. ábra. Irodai torzított áramhullámforma és összetevői saját mérés alapján.

A 6. ábrán látható egy irodában végzett egyfázisú hálózat analízis eredménye (a vízszintes tengelyen az egy T periódus idő alatt vett minták sorszámai láthatóak). Az áram jelalak akkora torzulást szenvedett, hogy a szinuszos hullámformáját fel sem lehet ismerni. Láthatjuk a sokszoros nullátmeneteket is. Jelenleg azon fogyasztók célzott kutatása folyik, melyek felelősek a fenti jelalakért. A mérés alapján bizonyítást nyert, hogy az irodai eszközöket és számítógépeket gyártók által hangoztatott harmonikus szűrések beépítettsége sok esetben nem igaz, vagy azok minősége nem megfelelő.



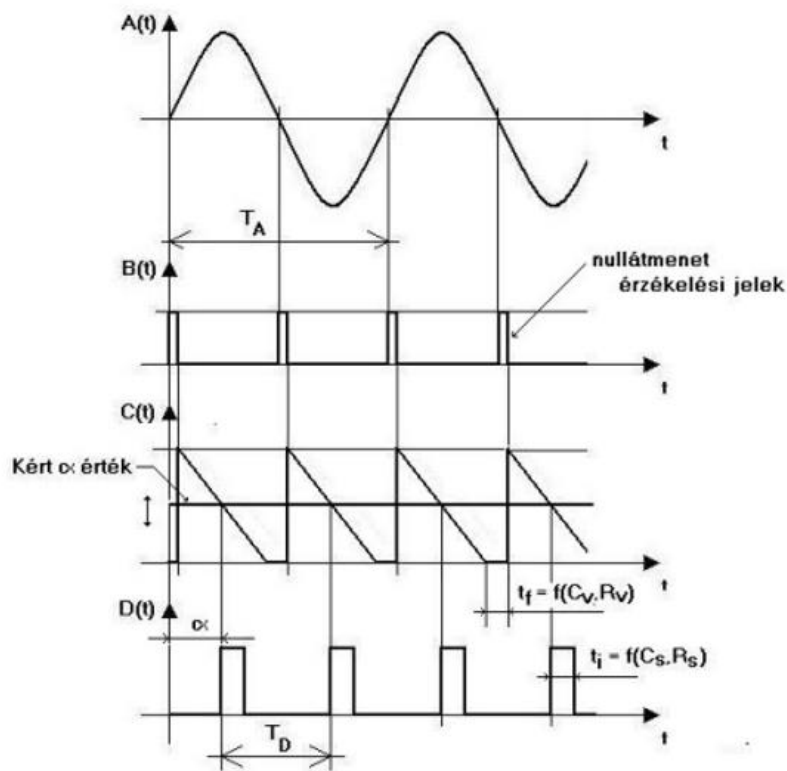
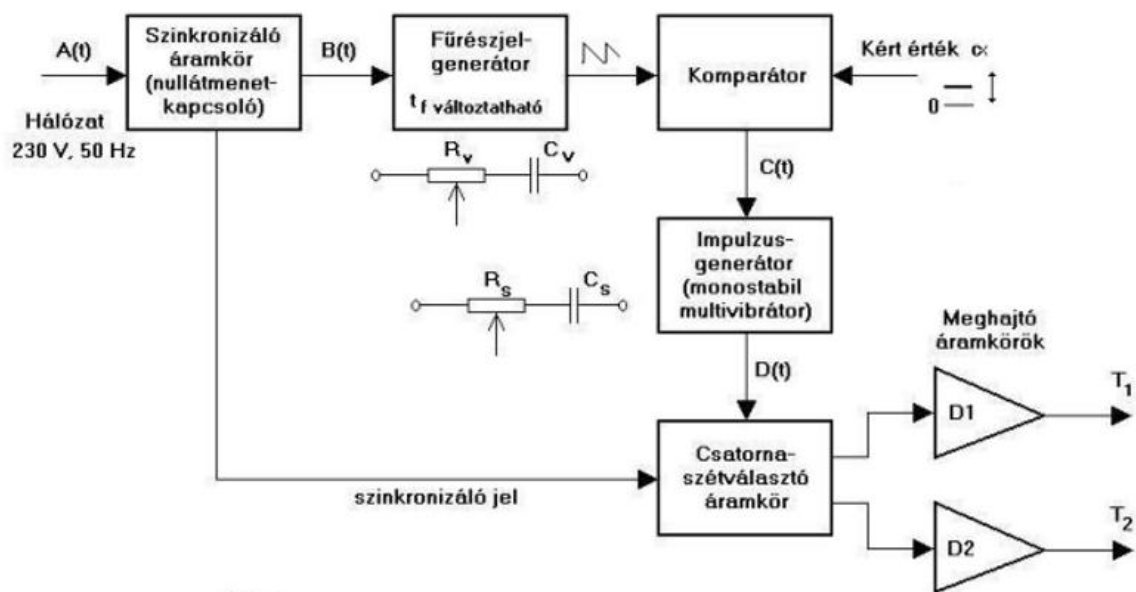
7. ábra. Irodai torzított áramhullámforma és összetevői saját mérés alapján.

A 7. ábrán látható a 6. ábra áramának frekvencia spektruma. A korábbiaknak megfelelően az ábrán a vízszintes tengelyen a sorszámok az alap frekvencia (50 Hz) egészszámú n -edik többszöröseit jelölik, míg a függőleges tengelyen az alapharmonikusra vonatkoztatott amplitúdót láthatjuk %-ban. A 3. harmonikus (150 Hz) igen magas, ami legfőképpen a LED-es világításokra jellemző, tehát az irodában lévő lámpatestek - a kivitelező állításával ellentétben - nincsenek szűrőkkel ellátva. Az alapharmonikusra vonatkoztatott negatív amplitúdót itt is a 180° fázis eltolódás okozza az alapharmonikushoz képest. A következő lépés egy teszt jellegű szűrő beépítése az irodák központi villamosenergia-ellátásába, majd ezt követően a mérések megismétlődnek. Később az irodai harmonikus zavarokra és a szűrésükre is egy matematikai modell lesz felállítva.



8. *ábra.* Áram felharmonikusok ábrázolása a frekvencia tartományban saját mérés alapján.

A 8. ábrán látható egy másik mérés frekvencia spektruma. A skáláról leolvashatóak a felharmonikusok alapharmonikusra vonatkoztatott amplitúdói. Itt az 5. felharmonikus 250 Hz-en közel 10%, ami már problémákat okoz. Viszont az is megállapítható a mérésből, hogy a 13. felharmonikus, 650 Hz is igen magas, közel 15%, ráadásul ez csak I2 és I3 áramokra igaz a háromfázisú hálózaton. Ennek az oka az aszimmetrikus terhelés, az I1 alapharmonikusra vonatkoztatott negatív amplitúdója esetén pedig a 180°-os fázis eltolódás. A pontos gyökér ok meghatározására további méréseket és kutatásokat igényel.



9. ábra. Hálózat nullátmenetre szinkronizált tirisztorvezérlő IC blokkvázlata és vezérlése (Puklus, 2007).

2.2. A harmonikusok jelenlétének lehetséges következményei

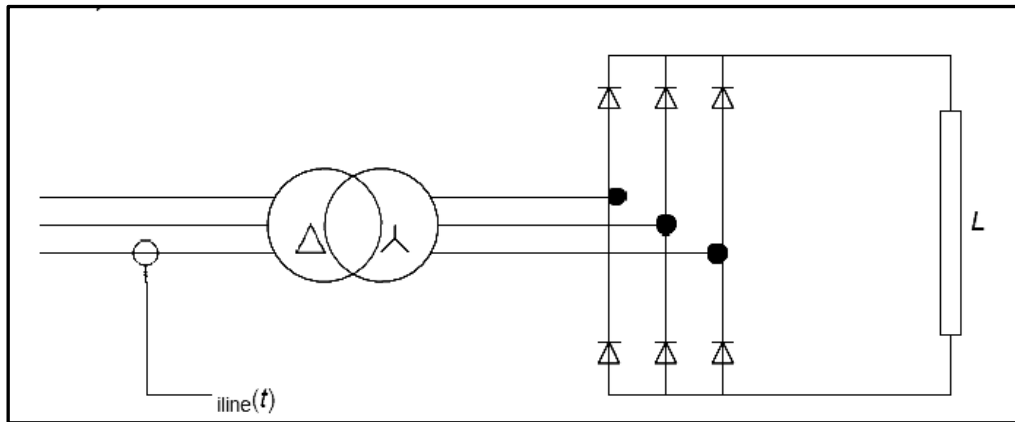
A 4. és 6. ábrákon látható torzult jelalakok alapján belátható, ha létrejön a többszörös nullátmenet, akkor a 9. ábrán lévő nullátmenettel szinkronizált, a tirisztorokat vezérlő áramkör, hibás kapcsolásokat hajt végre és ezáltal, a kitöltési tényező növekedése miatt, megnövekedhet a kapcsolóüzemű tápegység kimeneti feszültsége - ha nincs túlfeszültség védelem beépítve - tönkre teszi a róla megtáplált áramköröket.

A harmonikusok jelenlétének egyéb következményei is lehetnek, például a Skin-effektus (Chapman, 2001). Az egyenáram a vezető keresztmetszetén homogénean oszlik el, ezért az áramsűrűség a vezető teljes felületén megegyezik. Váltakozóáram esetében, a magas frekvenciákon ez már nem igaz, mert a váltakozóáram mindig a vezető külső felülete közelében igyekszik folyni, ezt a vezetőt körülvevő és a frekvencia ütemében változó elektromágneses tér okozza, amely a vezetőben az örvényáramhoz hasonló áramot hoz létre. A Lenz-törvény értelmében ez az áram nem örvényszerű, hanem a mágneses teret létrehozó árammal ellentétes irányú. A két áram egymást taszítja, a járulékos mágneses tér a vezető áramát a felületre szorítja, amely növekvő frekvenciáknál egyre nagyobb mértékben jelentkezik. Ezt a jelenséget skin-hatásnak nevezzük. Az esetek túlnyomó részében, a hálózati 50 Hz-es frekvencián ezzel nem foglalkozunk, mivel ezen a frekvencián a hatása még elhanyagolható. Viszont 250 Hz-től, vagyis az 5. felharmonikustól felfelé, a nagyobb frekvenciák esetén, már jelentős a hatása. hiszen növekvő járulékos veszteségeket hoz létre. Ezzel, főképpen az egyeres kábelek méretezésénél kell számolni. A harmonikusok hatással vannak a gyűjtősínekre is, melyek ugyan lemezelték, ami csökkenti a skin-hatást, viszont a rezgésekre való méretezésük miatt muszáj a harmonikusokat figyelembe venni.

3. Kapcsolóüzemű tápegységek

Az elmúlt 20 évben a kapcsolóüzemű tápegységek egyre nagyobb mértékben váltották fel az elektronikus berendezésekben a transzformátoros - egyenirányítós tápegységeket. Ezek a berendezések névleges teljesítményfelvételéhez viszonyítva nagy mennyiségű ötödik harmonikus kibocsájtást okoznak, amelyek véletlenszerűen fázis irányítottak és így összeadódnak. Következésképpen, a villamosenergia-ellátó rendszerekben, 400 kV-ig minden feszültség szinten, egyre nagyobb a harmonikus szintű torzítás háttérszintje. A háromfázisú elosztóhálózatokban leggyakrabban páratlan felharmonikusok fordulnak elő. Mindenképpen meg kell mérni a 3, 5, 7, 9, 11, 13 stb. harmonikusokat, gyakorlati tapasztalatok szerint egészen a 25. rendszámú felharmonikusig. A harmonikus feszültség torzítás növekedésével nő a berendezés idő előtti elöregedéséből és a nullavezetők túlterheléséből eredő széleskörű problémák kockázata.

A villamosenergia-rendszer generátorai rendszerint tiszta szinuszos hullámformát produkálnak a végpontjaikon. Ezt a szinuszos hullámformát tekintik a váltakozó feszültség tiszta formájának, az ettől való eltérést torzításnak nevezzük. Egyre többféle fogyasztó nem szinuszos áramot vesz fel a villamosenergia-rendszerből. Ennek következtében - az előzőekben leírtak szerint - a hálózati feszültségek és áramok szinuszos hullámformájának torzulása miatt, több nullátmenet is létrejöhet egy perióduson belül. A következmény a kapcsolóüzemű tápegységek hibás működése lesz. Példaként tekintsük a 10. ábrán látható kapcsolást.

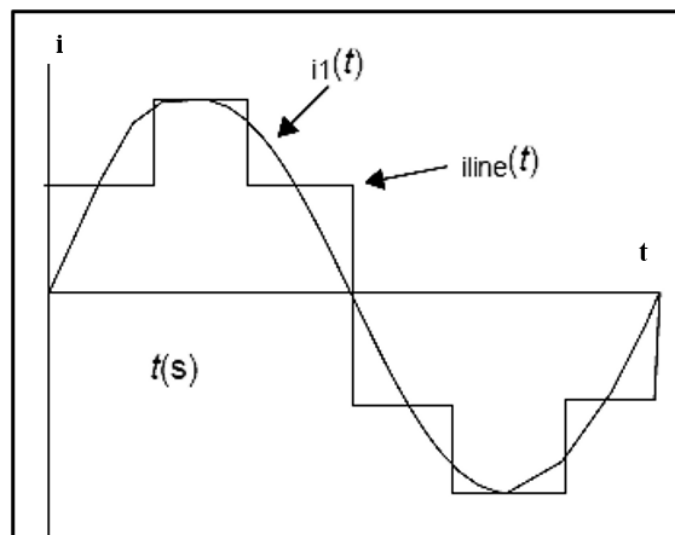


10. ábra. Példa egy olyan terhelésre, amely nem szinuszos terhelést vesz fel a hálózathoz (Sallam et al., 2019).

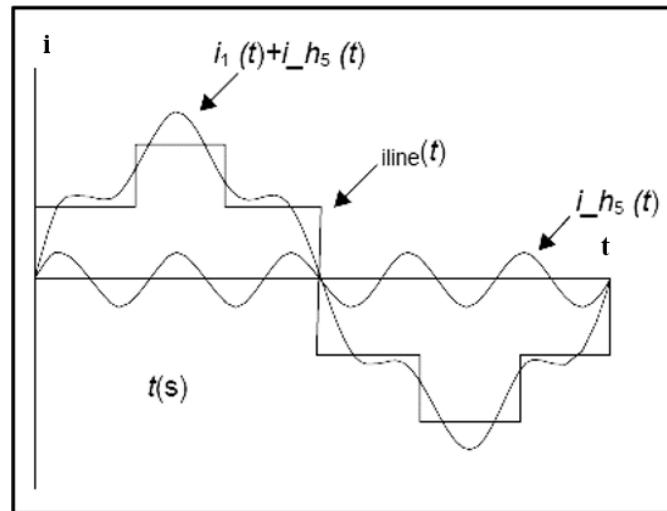
A tirisztorhíd egy transzformátoron keresztül egy tiszta szinuszos hálózathoz van csatlakoztatva. Ennek a szinuszos feszültség hullámnak a frekvenciáját f_1 alappfrekvenciának nevezzük. Amikor a terhelést csatlakoztatjuk a tápegységhez, vonali áram folyik, amelyet $i_{\text{line}}(t)$ -ként jelölve.

A 11. ábra az áram hullámformájának közelítését mutatja. Ebből az ábrából látható, hogy a vonali áram $i_{\text{line}}(t)$ erősen eltér a szinuszos áram hullámformájától, az $i_1(t)$ alapkomponeentől és ezért valamit hozzá kell adni ehhez a szinuszos komponenshez, hogy megkapjuk a ténylegesen folyó áramot.

Annak meghatározásához, hogy mi ez a „valami” nézzük meg a 12. ábrát, amely az $i_{h_5}(t)$ komponens $i_1(t)$ -hez az alappfrekvencia ötszörösének megfelelő frekvenciájú komponens hozzáadásával kapott áram hullámformáját mutatja.

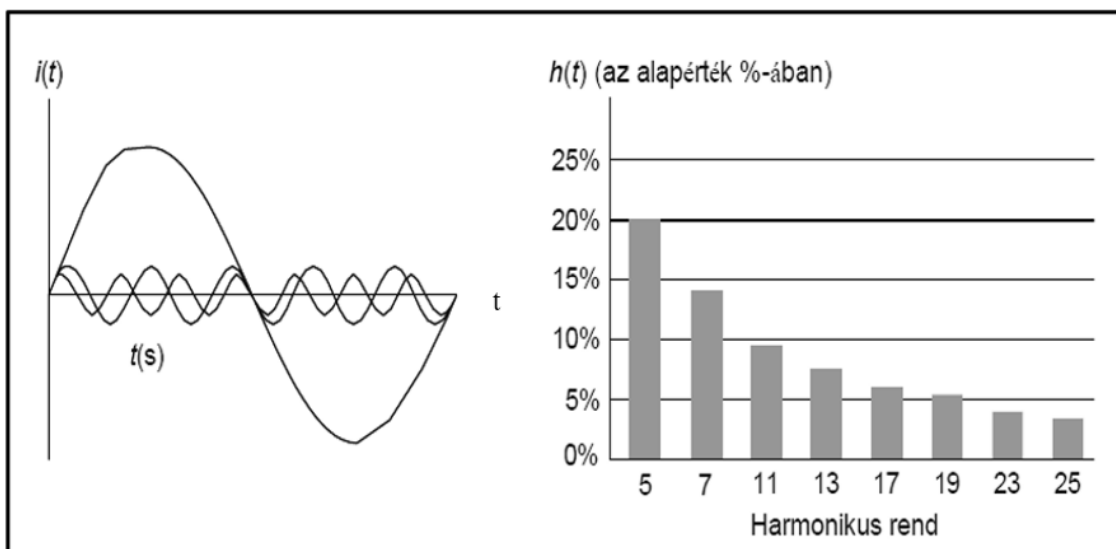


11. ábra. Háromfázisú, kétutas, hatütemű (3F, 2U, 6Ü) diódás egyenirányítótáp ágában folyó vonali áram (Sallam et al., 2019).



12. ábra. Az $i_{line}(t)$ vonali áram hullámforma összehasonlítása a $i_1(t) + i_{h5}(t)$ hullámformával (Sallam et al., 2019).

Meg kell jegyezni, hogy nem minden típusú terhelés juttat harmonikusokat az ellátórendszerbe. Ez a terhelési jellemzők típusától függ. Míg az előző ábrákon a vonali áramot és annak harmonikus összetevőit időtartományú hullámformákkal ábráztuk, addig egyszerűbb és elterjedtebb a harmonikusokat az áramspektrum segítségével ábrázolni. Ez a spektrum minden harmonikus frekvenciára mutatja az elemzett áramban jelenlévő megfelelő harmonikus komponensek nagyságát (13. ábra).



13. ábra. Az áram felharmonikusainak ábrázolása az időtartományban (balra) és a frekvencia tartományban (jobbra) (Sallam et al., 2019).

A fenti magyarázattól a harmonikusok olyan szinuszos feszültségek vagy áramok, amelyek frekvenciája többszöröse annak az alapfrekvenciának, amelyen a táprendszer működésre tervezték (pl. 50 Hz).

Egy villamos ellátórendszer eleve nagyon passzív, a generátor kimenetei és a rendszeren mért feszültségei közel szinuszosok lennének a deklarált frekvencián, ha nem lenne terhelés kapcsolva a rendszerre. Egy tiszta szinuszos feszültség hullám esetén, amelynek frekvenciája 50 Hz és amplitúdója 230 V, a spektrum minden frekvencián nulla, kivéve az 50 Hz-et, amelynél az érték 230 V.

Torzított feszültség hullám esetén a spektrum a torzítás jellegére jellemző harmonikus frekvenciákat tartalmaz. Az alapharmonikus a spektrum azon összetevője, amelyen a hálózatot működésre tervezték. Általában ez a spektrum első és legnagyobb összetevője. A „teljes harmonikus torzítás” (THD) kifejezés az összes jelenlévő harmonikus frekvencia feszültségének effektív összegét írja le az alaphoz viszonyítva.

A két legelterjedtebb torzítás indikátor az egyedi és a teljes felharmonikus torzítás mutatószám, melyeket rendre a (2) és (3) egyenletek írnak le. Előbbi megmutatja az adott h rendszámú megfigyelhető komponensnek az arányát, az alapharmonikushoz képest, míg utóbbi a jel eredő felharmonikus tartalmát viszonyítja az alapharmonikushoz. A két mutatószám analóg módon határozható meg feszültségre és áramra egyaránt (Kiss, 2020).

$$D_h = \frac{U_h}{U_1} \quad (2)$$

$$\text{THD}_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \quad (3)$$

ahol,

U_h = h -edik rendszámú felharmonikus feszültség,

U_1 = alapharmonikus feszültség,

D_h = egyedi harmonikus torzítás,

THD_U = teljes harmonikus torzítás.

Napjainkban a teljesítményelektronikai szabályozási alapú berendezések jelentik a kisfeszültségű hálózatok harmonikus szennyezésének fő forrását. Általában az ilyen berendezésekben a kapcsolóüzemű félvezető csak az alapperiódus egy töredékében vezet, ugyanis az ilyen típusú berendezések így nyerhetik el legfőbb tulajdonságaikat, az energiatakarékosságot, a dinamikus teljesítmény és a vezérlés rugalmassága tekintetében. Korábban már említésre került, hogy a villamosenergia ellátó rendszer generátorai rendszerint tisztán szinuszos hullámformát adnak ki a végpontjaikon, ez a szinuszos hullámforma a váltakozó feszültség tiszta formája, az ettől való eltérést már torzításnak nevezzük. Napjainkban egyre több az olyan fogyasztó, a különböző teljesítmény elektronikai megoldásokban található - kapcsolóüzemben használt félvezetők alkalmazása okán - melyek miatt a berendezés már nem szinuszos, hanem jelentős mértékű torzítást tartalmazó, nem folytonos áramot vesz fel a villamosenergia-rendszerből. A harmonikusok kialakulásának a magyarázata a következő. Amíg lineáris fogyasztó esetén egyenes arányosság van az feszültség és az áram között, addig nem lineáris, nem folytonos fogyasztók esetén megfigyelhető, hogy az áram már nem a szinuszos feszültség jelalakját követi, hanem úgynevezett pozitív és negatív áramcsúcsok jelentkeznek. Mivel a kapcsolóüzemben használt félvezetők a hálózati alapperiódus periódus idejének csak töredékében vezetnek, ezért a fogyasztók pulzáló bemenő áramot vesznek fel a hálózatról és ezek a pulzáló áramok okozta visszahatások okozzák a felharmonikusokat a villamos hálózaton.

A kutatások során a cél, hogy a felharmonikusok okozta lehetséges problémák pontosan beazonosításra kerüljenek, elsősorban az iparban használt elektronikai és informatikai eszközökben. Egzakt matematikai módszert kell találni a létrejövő harmonikusok identifikálására és a hálózati visszahatások preventív célú kiszámolására azért, hogy még az elektronikai kapcsolások tervezési szakaszában a harmonikusok várható nagyságát előre meg tudjuk határozni. Illetve, hogy ezen információk birtokában megtaláljuk a villamos hálózaton már meglévő harmonikusok ellen célirányosan, az adott berendezés érzékenységének megfelelő, specifikus, lokális, költséghatékony szűrési módszereket.

4. Harmonikusok szűrése

Ha harmonikusokkal „szennyezett” az elosztó hálózat, akkor az energiaszolgáltatás minőségi paramétere is jelentős mértékben romlanak. Megnö az áram valódi effektív értéke (RMS=Root Mean Square=effektív érték) a nullavezetőben. Ha a háromfázisú villamos hálózatban teljesen szimmetrikus terhelést tételezünk fel, azaz az egyes fázisok és a nullavezető közé azonos nagyságú terhelések vannak kapcsolva, akkor az összegzésnél az alapharmonikus, a pozitív sorrendű- és a negatív sorrendű harmonikusok kiesnek, míg a zérus sorrendűek algebrailag összegződnek. Emiatt a nullavezető árama még szimmetrikus terhelés esetén sem lesz zérus, ugyanis a három fázisvezetőben folyó zérus sorrendű áramok összege folyik a nullavezetőben. A nullavezető áramának az effektív értéke a zérus sorrendű áramok effektív értékének a négyzetösszegének négyzetgyökeként számítható. Ez szimmetrikusan kapcsolt nemlineáris terhelések esetén a nullavezetőben lényeges többlet terhelést eredményez. Olyan helyeken, ahol a terhelések zöme nemlineáris pl. irodaházak, a fázisvezető áramának a 2-3 szorosára is folyhat a nullavezetőben (Tarnik, 2008). A harmonikusok miatt a generátorokban, a motorokban és a transzformátorokban túlterhelés következhet be. A True (valós) RMS bármilyen jelalakú váltakozó áramú áramkör feszültség és vagy áramerősségmérése során azt az effektív értéket adja vissza, amely ugyanazt a hatást fejt ki és ugyanarra a teljesítményre képes, mint az ugyanolyan feszültségű vagy áramerősségű egyenáram tenné, vagyis ez a valós effektív érték mérése bármilyen jelalaknál. A harmonikusokkal szennyezett hálózaton a villamos készülékek nem kívánt rázkódásnak és korai öregedésnek lehetnek kitéve, valamint növekszik a transzformátorok zúgása, nem kívánt hanghatása is. Nem beszélve a fázisjavító kondenzátorok túlterhelődéséről, ami szintén korai öregedésükhöz és idő előtti cseréjükhöz vezethet, emiatt jelentős kiadást generálva a felhasználóknak. A háromfázisú, szimmetrikus rendszerben, ha nincsenek áramharmonikusok, a nullavezetőben nem folyik áram. Harmonikusok jelenlétében azonban a nullavezetőben is jelentős áram folyik, ami többszöröse lehet a fázisáramnak. A védelmek indokolatlanul megszólalhatnak, ez csökkenti az energiaellátás biztonságát, a védelem megszakítóinak élettartamát. A meddőáram kompenzáló rendszerek működésében is zavart okoz, rezonáns feszültségeket kelt a hálózat induktív jellege és a meddőkompenzáló kapacitív rendszer alkotta rezonáns körben (Mérőműszerek, 2022).

A valóságban a létrejövő feszültségtorzulás (korlátozott mértékig) arányos a táphálózat impedanciájával, ami bizonyítja, hogy áramgenerátor jellegű a harmonikus forrás. A táphálózat impedanciája általában nagyon kicsi, ezért kicsi lesz a harmonikus áram okozta feszültségtorzulás is, sokszor olyan kicsi, hogy elvész a háttérzajban. Ez félrevezető lehet, mert azt a látszatot kelti, hogy nincs harmonikus probléma, noha valójában nagyok a harmonikus áramok. A probléma ahhoz hasonlítható, amikor földben folyó köráramot feszültség méréssel szeretnénk megtalálni. Amikor harmonikusra gyanakszunk, vagy bizonyítani próbáljuk, hogy nincs, áramot kell mérni.

Az egyik legegyszerűbb megoldás a harmadik harmonikus kiszűrésére a transzformátor, amelyet minden KÖF/KIF (Középfeszültség/Kisfeszültség) transzformátor alából ellát úgy, hogy a földelt csillag/delta kapcsolású transzformátorok esetében a delta oldalra nem kerül át a 3. harmonikus áram. Ez nem csak a KÖF/KIF feszültség átalakítás esetében alkalmazható, hanem leválasztó transzformátorként is alkalmazhatjuk a kapcsolást, amely így biztosítja a harmadik harmonikus kiszűrését. Viszont, a nagyteljesítményű transzformátorok esetében - a primer és szekunder tekercsek közötti kapacitás miatt, melynek az értéke igen magas is lehet - nagy teljesítménnyel tudnak átmenni a harmonikus feszültségek a primer oldalról a szekunder oldalra. Szintén problémát jelentenek a villamos hálózatról a nulla és a földelővezetőn érkező harmonikusok, melyeknek a transzformátor már semmilyen harmonikusát nem szűri ki. Ezért a nullavezető keresztmetszetének megválasztásakor feltétlenül figyelembe kell venni a hálózat harmonikus lehetséges tartalmát (Lantos, 2016).

Az aktív harmonikus szűrőkkel a fogyasztói áram jelét alakítják minél tökéletesebbre úgy, hogy a fogyasztó által felvett harmonikusokkal szennyezett áramba ellenkező előjelű, harmonikus áramot táplálnak be „valós időben”, ezáltal a hálózat felé tiszta (50 Hz) szinuszos jelalak jelenik meg, amely nem torzítja el a hálózati feszültséget. A manapság előforduló aktív harmonikus szűrők mindezt 300-500 μ s-os válaszidővel képesek követni, amit az 50 Hz-es hálózati frekvenciához, vagyis a 20 ms-os hálózati T periódusidőhöz érdemes viszonyítani. A kompenzálást az 50. harmonikusig végzik, a gyakorlatban azonban a 25. felharmonikus felett már nem igazán fordulnak elő kompenzálendő áramok. A jelalakok előállításához IGBT szigetelt kapus bipoláris teljesítmény tranzisztorokat használnak 10-15 kHz-es kapcsolási frekvenciával.

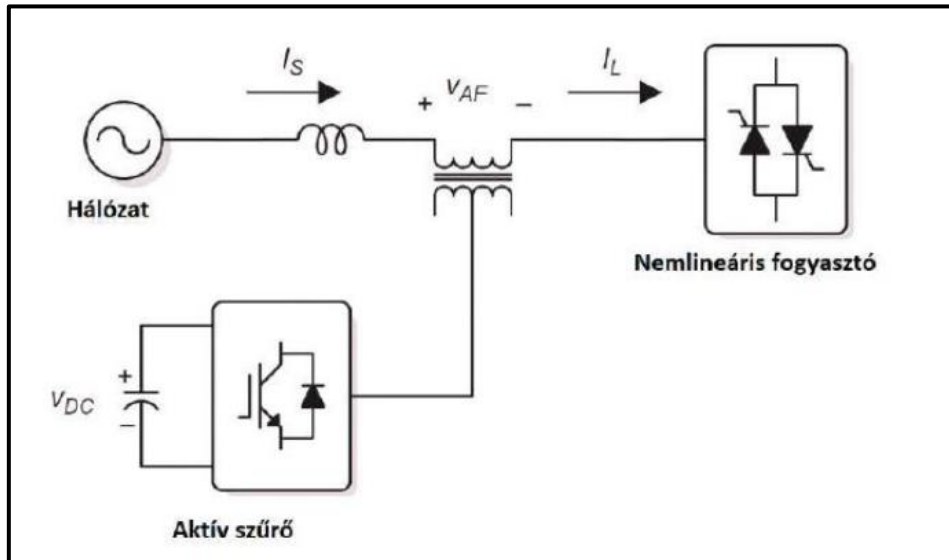
Egy másik villamos hálózati minőség javító eljárás az aktív hálózati kondicionáló (Grady et al., 1991) (APLC) ami, egy olyan aktív szűrőtípus, amely kompenzálja a villamosenergia-rendszer hullámformájának torzulását. A szakirodalomban a cél egy olyan eljárás kidolgozása és bemutatása volt, amellyel kiszámítható a feszültségharmonikus torzítás minimalizálásához szükséges AP LC-injektált áram nagysága a teljes villamos hálózaton. Az eljárást az AP LC frekvenciatartománybeli korrekcióval történő alkalmazásra szánják olyan hálózatokban, amelyekben periodikus harmonikus torzítás tapasztalható. Az injektálási áramok meghatározása nemlineáris optimalizációs elmélet segítségével történik. A fő megoldás egy egyszerű eljárás kifejlesztésében rejlik, az optimális AP LC injektálási áram hullámformájának Fourier-sorozatának megtalálása. Az eljárás a következő helyzetek bármelyikében alkalmazható: 1. egyfázisú AP LC egyfázisú hálózatban; 2. egyfázisú AP LC háromfázisú hálózatban; vagy 3. háromfázisú AP LC kiegyensúlyozott háromfázisú hálózatban.

A soros kialakítású aktív felharmonikus szűrő látható a 14. ábrán. Ez a típus egy erre a célra kialakított transzformátoron keresztül kapcsolódik a villamos hálózatra. Előnye a feszültség esések hatásainak kompenzálása és a feszültség felharmonikus tartalmának közvetlen befolyásolása. Nagy hátránya a bonyolult kialakítása miatti magas előállítási költsége, valamint a kapcsolási rajzból is látszik, hogy nagyon nehezen illeszthető be a meglévő villamos hálózatba. Ezért e helyett inkább a sönt típusú szűrő terjedt el a gyakorlatban, szinte csak ezt használják manapság.

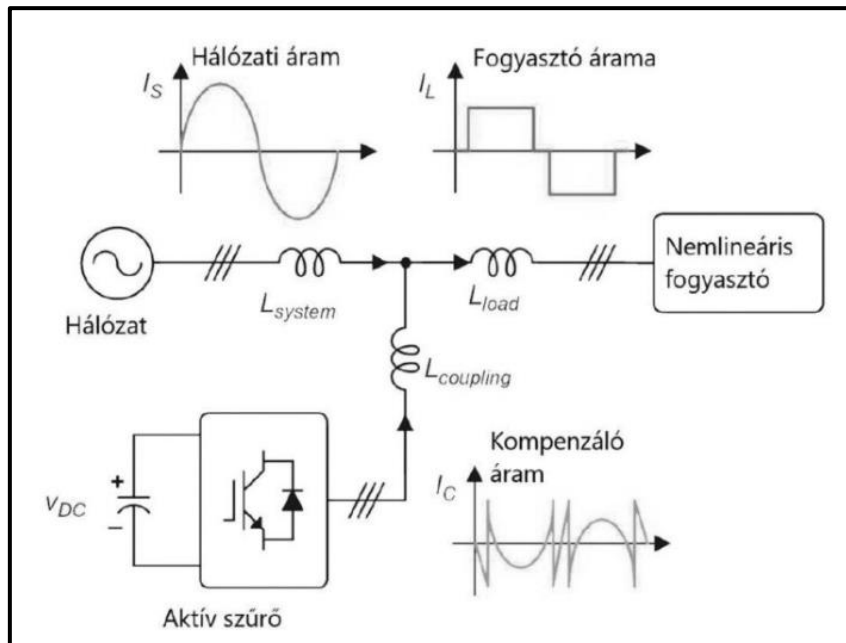
Sönt kialakítású aktív felharmonikus szűrőre mutat példát a 15. ábra. Ez a szűrő típus a mért, nemlineáris fogyasztó által létrehozott felharmonikus árammal megegyező nagyságú, de ellentétes fázisú áramot juttat a hálózatba. ennek következtében a betápláló hálózat felé már csak alapharmonikust tartalmazó eredő áram fog folyni (4).

$$I_{\text{hálózat}} = I_{\text{szűrő}} + I_{\text{fogyasztó}} \quad (4)$$

A szűrő PWM impulzusszélesség modulációs módszerrel hozza létre az elvárt jelalakot. Ezek a szűrők képesek a harmonikusok szűrésére az 50 rendszámig. Ehhez NPC (Neutral Point Clamped) (Fernandez, 2021) topológiájú invertert használnak, IGBT felvezetők alkalmazásával.



14. ábra. Soros kialakítású aktív szűrő (Kiss, 2020).



15. ábra. Sönt kialakítású aktív szűrő (Kiss, 2020).

5. Összefoglalás

Gyakorlatilag minden modern elektromos és elektronikus berendezés rendelkezik kapcsolóüzemű tápegységgel, vezérli az így vagy úgy felvett villamosenergiát és ezáltal nemlineáris terhelést hoz létre. Tökéletes az a tápegység, amely a feszültségével és frekvenciájával a megengedett határokon belül van és tökéletesen szinuszos feszültséggörbével rendelkezik, de sajnos ilyen a gyakorlatban nem létezik. A villamos harmonikusok a modern elektronika melléktermékei. Különösen ott vannak elterjedve, ahol nagyszámú számítástechnikai és elektronikus teljesítményszabályozó eszköz van. A villamosenergia műszaki minősége, azon belül is a felharmonikusok értéke egyre nagyobb figyelmet kap napjainkban. A felharmonikusok csökkentésének korszerű módja az aktív felharmonikus szűrő berendezések alkalmazása. Ezek az eszközök felépítésüknél fogva, egyidejűleg több funkció elvégzésére is alkalmasak, a felharmonikus szűrés helyett komplex, villamos teljesítmény formálási feladatot látnak el.

A kutatás jövőbeli céljai között szerepel, hogy elsősorban a ZF Hungária Kft-nél (a szerző jelenlegi munkahelye, a világ egyik legnagyobb, sebességváltókat és autó alkatrészeket gyártó, autóiipari beszállítója) minden kritikus erősáramú villamos hálózati szekcióban sor kerüljön hálózatanálízisre. A mérések alapján pedig egy aktív szűrővel ellátott, torlófolytós fázisjavító berendezés beszerzése a végső cél, melynek beüzemelését követően el kell végezni a validálást, hogy a számítások pontosak voltak-e. Mind detektálási, mind szűrési aspektusból a kutatással kapcsolatos tapasztalatok megosztása céljából már megtörtént a kapcsolatfelvétel az áramszolgáltatóval és más cégekkel is.

Irodalom

- [1] Aktif (2021.02.02). *Problems caused by harmonics in electrical plants*. <https://aktif.net/en/problems-caused-by-harmonics-in-electrical-plants/#>
- [2] Caicedo, E. J., Romero, A. A., Zini, C. H. (2017). Assessment of the harmonic distortion in residential distribution networks. *Ingenieria e Investigación*, 37(3), 72–84. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v37n3.64913>
- [3] VLED.hu (2019.04.01.). *Mit jelent a THD a LED tápegységeken?* <https://www.vled.hu/blog/mit-jelent-a-thd-a-led-tapegységeken>
- [4] Uddin, S., Shareef, H., Mohamed, A. (2013). Power quality performance of energy-efficient low-wattage LED lamps. *Measurement*, 46(10), 3783–3795. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.07.022>
- [5] Wang, H., Zhou, W., Qian, K., Meng, S. (2019). Modelling of ampacity and temperature of MV cables in presence of harmonic currents due to EVs charging in electrical distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 112, 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.04.027>
- [6] Sallam, A. A., Malik, P. O. (2019). *Electric Distribution Systems - Harmonics in Electric Distribution Systems*. Wiley-IEEE Press. <https://doi.org/10.1002/9781119509332.ch14>
- [7] Kiss, J. (2020). *Aktív felharmonikus szűrők alkalmazásának lehetőségei*. <https://www.muszakimagazin.hu/2020/01/29/aktiv-felharmonikus-szurok-alkalmazasanak-lehetosegei/>
- [8] Puklus, Z. (2007). *Teljesítményelektronika*. Egyetemi jegyzet. http://www.sze.hu/~szeliz/Teljesitmenyelektronika/Jegyzetek/Teljesitmenyelektronika_Puklus.pdf
- [9] Chapman, D. (2001). *Villamosenergia-minőség - Harmonikusok források és hatások*. Alkalmazási segédlet, European Copper Institute. <https://www.muszeroldal.hu/measurenotes/harmonikusok.pdf>

- [10] Tarnik, I. (2008). *Villamos hálózati zavarok*. Jegyzet.
<https://www.muszeroldal.hu/measurenotes/tarmikcikk.pdf>
- [11] Mérőműszerek: True RMS jelentése multimétereknél (2022).
https://www.meromuszerek.hu/true_rms_jelentese
- [12] Lantos, T. (2016.11.08.). *Torzító harmonikusok a hálózaton*.
<https://www.villanylap.hu/hirek/4248-torzito-harmonikusok-a-halozaton>
- [13] Grady, W. M., Samotyj, M. J., Noyola, A. H. (1991). Minimizing network harmonic voltage distortion with an active power line conditioner. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6(4), 1690-1697. [https://doi.org/ 10.1109/61.97708](https://doi.org/10.1109/61.97708)
- [14] Fernandez, G. (2021). *Neutral Point Clamped Inverter (NPC)*. TN135.
<https://imperix.com/doc/implementation/neutral-point-clamped-inverter>