

A FESZÜLTSG ÉS ÁRAM HARMONIKUS TORZÍTÁSOK, AZ IEEE 519-2022 SZABVÁNY

VOLTAGE AND CURRENT HARMONIC DISTORTIONS, IEEE 519-2022 STANDARD

Kovács Attila *, Somogyiné Dr. Molnár Judit **, Dr. Jármái Károly ***

ABSTRACT

The paper aims to present the possible effects of harmonic distortions and the practical application of the IEEE 519-2022 standard, primarily in industrial facilities. However, several papers have already been published regarding harmonic disturbances, including only a theoretical approach. Therefore, we would like to present the difference between current and voltage harmonic disturbances and their effects in an industrial environment, the significance of specific limit values of the standard, as well as what new concepts have been introduced.

szabványok a lakossági hálózatra csatlakoztatott, fázisonként 16 Ampernél nagyobb, de legfeljebb 75 Amper áramfelvételű eszközökre vonatkoznak, 230 Voltos feszültség szinten. Egy másik, az IEC 61000-3-6 szabvány a középfeszültség (KÖF), a magasfeszültség (NAF) és az extra magas (UHV) feszültségű hálózatokhoz csatlakoztatott berendezések harmonikus kibocsátásának kiértékelési eljárásait mutatja be [3]. Ezek a torzítási határértékek a feszültségekre vonatkoznak, mindkét IEC szabvány (61000-3-2 és 61000-3-12) feszültségharmonikus határértékeket ad meg. Az IEEE 519-2022 [4] szabvány viszont már a berendezések telepítéséhez ajánl megengedett maximális harmonikus torzítási értékeket.

1. BEVEZETÉS

A villamos energia rendszerekben gyakorlatilag minden mindennel összefügg, így alkotnak egy komplex rendszert. A villamos energia minősége hatással lehet az egyes villamos fogyasztókra, azok működését nagyban befolyásolhatja. Ezért az energia minőségével kapcsolatos elemzéseknek, kutatásoknak és szabványalkotásoknak nagy a jelentősége. Különösen, ha figyelembe vesszük az egyre nagyobb minőségi elvárásokat, nem csak a szünetmentes ellátással, hanem a hálózatra csatlakoztatott berendezéseink, eszközeink üzembiztonságát befolyásoló tényezők csökkentésével kapcsolatban is.

A következő fejezetekben bemutatásra kerülnek a feszültség és az áramharmonikus torzítások és azok hatásai közötti különbségek, illetve a villamos energiarendszerek felharmonikusával kapcsolatos különböző IEEE és IEC szabványok. Az energiarendszer harmonikus torzítási szintjének szabályozására vonatkozó IEC szabványok két kategóriába sorolhatók. Az IEC 61000-3-2 [1] és 61000-3-12 [2] szabványok a harmonikus kibocsátásra vonatkozó határértékeket adnak meg berendezések esetében, de ezen értékek a laboratóriumban történő vizsgálatra vonatkoznak, tehát még a hálózatra csatlakoztatásuk előtt értendőek. Ezek a

2. AZ ÁRAM ÉS FESZÜLTSG HARMONIKUSOK KÖZÖTTI KÜLÖNBBSÉGEK

A felharmonikusokról szóló szakirodalom viszonylag keveset foglalkozik az áram- és feszültségharmonikusok közötti különbséggel. Pedig az áram- és feszültségharmonikusok összefüggenek, de a hatásuk a hálózatra és berendezésekre különböző. Ebben a fejezetben bemutatjuk, mi a különbség a feszültség és áram harmonikusok között.

Vizsgáljuk meg az áramtorzítás lehetséges hatásait. A nemlineáris terhelések működéséből adódó áramfelvétel torzítja az áram szinuszos hullámformáját, az áramtorzítás közvetlen hatása egy ipari létesítményben egy közös csatlakozási ponton (Point of Common Coupling - PCC) belül a többi, csatlakoztatott berendezésekre minimális, hiszen a harmonikus áramok nem tudnak más berendezésekbe injektálódni, csak magát a harmonikusokat előállító nemlineáris terhelésekbe folynak be, így azokra hatnak. Tehát az áramharmonikusok nem befolyásolják a közös csatlakozási pontra (PCC) csatlakozott többi lineáris berendezés terhelését. Ami természetesen akkor igaz, ha vezeték impedancia elég kicsi ahhoz (merek hálózat), hogy ne torzuljon észrevehetően a feszültség.

* PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

** Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

*** Egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék

Viszont az áramtorzulás hatása jelentős lehet a villamosenergia elosztórendszerekre, mert a rendszerben folyó megnövekedett áram miatt az egy transzformátorkörön folyó megengedett áramerősség a transzformátor teljesítményétől függően korlátozva van. Gyakorlati példával élve, egy 36kV/400V feszültségátviteli, 3fázisú, 1,6MVA villamos teljesítményű transzformátor szekunder oldali maximális árama 2200 A lehet, de minél több felharmonikus áram terheli, annál kisebb alapharmonikus áramot tud biztosítani. Mivel a harmonikus áram nem ad hasznos teljesítményt, annak jelenléte csökkenti a csatlakoztatható terhelések lehetséges összteljesítményét. A harmonikus áramok hatására, ahogyan távolodunk a harmonikusok forrásától - a növekvő impedancia miatt - az eredő harmonikus feszültségek egyre nagyobbak lesznek. Tehát a harmonikus áramok átfolynak a hálózat impedanciáin, ami nagyobb alapharmonikusra vetített amplitúdójú harmonikus áramok esetén, nagyobb amplitúdójú harmonikus feszültségeket eredményez. Az alapharmonikus feszültség effektív értéke csökken, a harmonikus feszültségek és a Teljes Harmonikus Torzítás (THD) értéke megnövekszik. Mi is az a Teljes Harmonikus Torzítás? A legelterjedtebb torzítás mutatók az egyedi és a teljes harmonikus torzítás. Az (1) egyenlet megadja az adott harmonikus feszültség amplitúdójának az arányát az alapharmonikus nagyságához viszonyítva. A (2) egyenlet a Teljes Harmonikus Torzítást (THD) írja le, azaz az összes jelenlévő harmonikus feszültség effektív értékeinek az összegét viszonyítja az alapharmonikus feszültség effektív értékéhez. Az egyenletekből egyszerű számolásokkal meghatározhatóak az egyes torzítások értékei. Az alapharmonikus (50Hz) feszültség hatására jön létre az alapharmonikus (50Hz) áram, ezzel ellentétben a felharmonikus feszültséget a felharmonikus áram hozza létre. Ezt nevezik az impedancia ellentétes hatásának a feszültségre. Az áram-hullámalak torzítás egyik kimutatott hatása a villamos hálózatokon a vezeték és transzformátor túlmelegedések, a másik pedig az feszültség hullámalak torzulása. Ennek a feszültség hullámalak torzításnak a villamos elosztórendszerre minimális hatása van, de az áram hullámalak torzítással ellentétben az ipari létesítmény egyik területén generált harmonikus feszültségek megjelennek az adott létesítményen belüli közös erőáramú villamos elosztósíneken. Ha egy nemlineáris terhelésen mérve a feszültség jelalak torzulása jelentős, az még nem jelenti azt, hogy a teljes közös csatlakozási ponthoz (PCC) tartozó villamos hálózaton is nagy lesz. A torzítás annál kisebb lesz minél közelebb van az erőáramú sínrendszer mért pontja a betáplálást adó transzformátor kapcsaihoz. De amennyiben a transzformátor szekunder kapcsainál van a feszültség hullámalak torzulása, akkor az áthaladhat a transzformátorra csatlakoztatott teljes erőáramú

sínhálózaton, és megjelenhet a torzítás kiindulópontjától távol lévő berendezésekben is.

$$D_h = \frac{U_h}{U_1} \quad (1)$$

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \quad (2)$$

ahol,

U_h = h -adik rendszámú felharmonikus feszültség effektív értéke,

U_1 = alapharmonikus feszültség effektív értéke,

D_h = egyedi harmonikus torzítás,

THD_U = teljes harmonikus torzítás.

3. AZ IEEE 519-2022 SZABVÁNY

A szabványok vizsgálatakor különbséget kell tenni az áramszolgáltató villamosenergia elosztó hálózatára vonatkozó, az úgynevezett lakossági hálózatra csatlakoztatott eszközök, berendezések és az ipari létesítmények belső villamos hálózatára ajánlott maximálisan megengedett feszültség és áramtorzítási értékek között. Az MSZ EN 61000-3-12, vagy IEC 61000-3-12 szabványokat egy termék laboratóriumi körülmények közötti vizsgálatára kell alkalmazni, míg az IEEE 519-2022 szabvány a berendezések telepítéséhez ajánl megengedett maximális harmonikus torzítási értékeket. Áramharmonikusok esetében az IEEE 519 szabvány alkotói úgy döntöttek, hogy attól függően korlátozzák az áram harmonikusok nagyságát, hogy mekkora teljesítményű a feszültségforrás. Ez logikus, hiszen egy nagy villamos teljesítményű hálózat sokkal nagyobb mértékben képes az áram harmonikusok hatását elnyomni anélkül, hogy az a feszültségét befolyásolná, mint egy alacsonyabb teljesítményű hálózat. Az áram harmonikus határértékek létrehozásának a célja az volt, hogy korlátozzák az egyes fogyasztók harmonikus injektálását a hálózatba azért, hogy azok ne okozzanak elfogadhatatlan feszültség szinuszhullám torzulást [5]. Az IEEE 519 szabvány a harmonikusok rendenkénti torzításának és az áram-igény szerinti harmonikus torzítás (Total Current Demand Distortion – TDD) határértékeit határozza meg, nem pedig a teljes harmonikus torzítást (THD). A lehetséges maximális THD értékeket csak a feszültség esetében adja meg és annak nagyságát a közös csatlakozási pont (Point of Common Coupling - PCC) feszültség szintjétől teszi függővé. Lényeges különbség, hogy az IEEE 519 szabványban a feszültségharmonikusok határértékei minden frekvencián állandóak, míg az IEC 519-ben a feszültségharmonikusok megengedett nagysága a frekvenciával csökken. Az IEEE 519-2022 szabvány többek között két követelményt támaszt a harmonikusokkal szemben, az abszolút maximális

feszültség torzítást (Total Harmonics Distortion - THD), vagyis a THD_U , valamint a változó maximális teljes áram-igény szerinti harmonikus torzítás (Total Current Demand Distortion – TDD). Előbbi esetében az 1. táblázatban, míg utóbbinál a 2. táblázatban láthatjuk a vonatkozó határértékeket. A TDD a közös villamos hálózati csatlakozási pont (Point of Common Coupling – PCC) zárlati áramának (I_{SC}) és csatlakoztatott eszköz terhelő áramának (I_L) arányától függ. Ezzel különbséget teszünk, hogy az egyes berendezések által termelt áram-harmonikusok, milyen hatással vannak a hálózatra. Ugyanis a kisebb áramfelvételű fogyasztók által termelt felharmonikusok a nagyfogyasztókhoz képest kevésbé tudják befolyásolni a hálózaton villamos energia minőségét. A szabványban megengedett TDD értékek az adott közös csatlakozási pontra (PCC) vonatkoznak, amely az erősáramú betáplálási pont és a csatlakoztatott berendezések közötti csatlakozást biztosítja és bármilyen feszültségszinten alkalmazható. Ipari körülmények között a PCC a saját villamos hálózat, vagy villamos elosztórendszer belső pontjának tekintendő. Az IEEE 519-2022 abban különbözik az IEEE 519 eredeti szándékától, hogy az utóbbi csak az áramszolgáltató és a fogyasztó közötti csatlakozási pontot vette figyelembe. Ezzel ellentétben az IEEE 519-2022 már lehetővé teszi a belső villamos hálózat több csatlakozási pontra (PCC) való felosztását. Így egy nagyméretű ipari létesítményben több, különböző erősáramú, megszakítóval védett közös csatlakoztatási pontokra lehet külön-külön alkalmazni a szabvány határértékeit.

1. táblázat. IEEE 519-2022 szabvány szerint lehetséges feszültség torzítási határértékek.

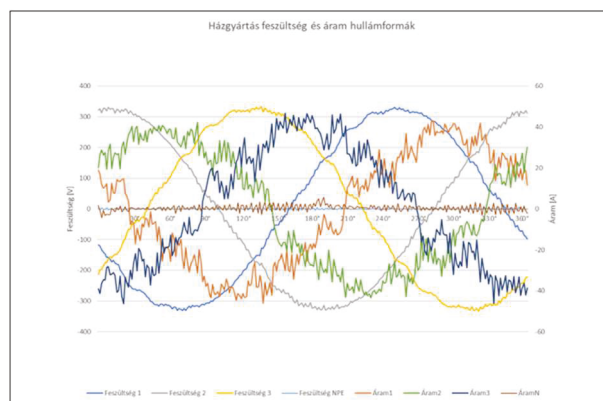
Villamos elosztósínek feszültsége (%)	Harmonikus rendenkénti egyéni torzítás (%)	Teljes harmonikus torzítás THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5*

*A nagyfeszültségű rendszereknél a THD 2,0%-ig megengedett, ha azt egy nagyfeszültségű egyenáramú (High-Voltage Direct Current – HVDC) terminál okozza és melynek hatásait a hálózat azon pontjain csillapították, ahová majd a jövőbeni felhasználók csatlakozhatnak.

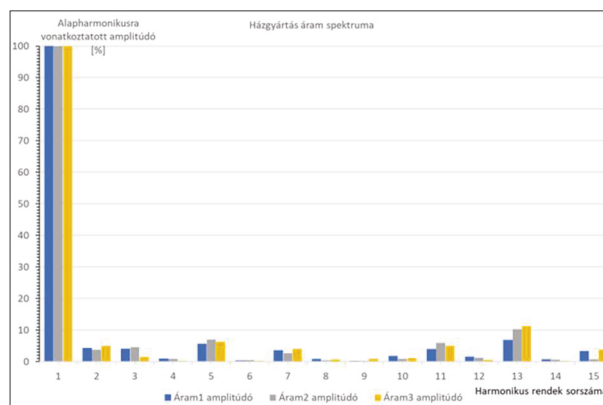
2. táblázat. IEEE 519-2022 szabvány szerint lehetséges áramtorzítási határértékek 120V-tól 69kV-ig.

I_{SC}/I_L	Harmonikus határértékek rendek szerint [%]	Harmonikus határértékek rendek szerint [%]	Harmonikus határértékek rendek szerint [%]	Harmonikus határértékek rendek szerint [%]	Harmonikus határértékek rendek szerint [%]	Teljes áram-igény szerinti harmonikus torzítás [%]
	$2 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

A következőkben egy ipari példát mutatunk be az IEEE 519-2022 szabvány alkalmazására. Egy hagyományos gyár egyik gyártóberendezését vizsgáltuk, a méréseket kiterhelt közeli állapotban végeztük. Az 1. ábra alapján megállapíthatjuk, hogy a feszültség szinuszhullámainak torzulása nem, de az áramé már jelentősnek tekinthető. A gyártóberendezés közös csatlakozási ponton (PCC) mért teljes áram harmonikus torzítása $THD=17,30 \%$ volt. Az IEEE 519-2022 szabvány az áram teljes harmonikus torzításának megengedett maximális értékét a teljes áram-igény szerinti harmonikus torzítás, a TDD értékével adja meg, amely a közös villamos hálózati csatlakozási pont, a PCC zárlati áramának (I_{SC}) és az adott eszköz terhelő áramának (I_L) arányától függ. Ez az arány most $630A / 28,2A=22,3$, ami $20<50$, tehát a 2. táblázat szerint a teljes áram-igény szerinti harmonikus torzítás mértéke 8% lehetne. Ha megvizsgáljuk a 2. ábrán lévő áramok spektrumát, akkor észrevehető, hogy az ötödik és tizenegyedik felharmonikusok értéke meghaladja a 2. táblázatban szereplő, a szabvány által lehetséges 4%-ot, illetve jelentősnek mondható a tizenharmadik rend esetében a 10,28%, hiszen ez a táblázat szerint megengedett 2%-os érték, több mint ötszöröse.

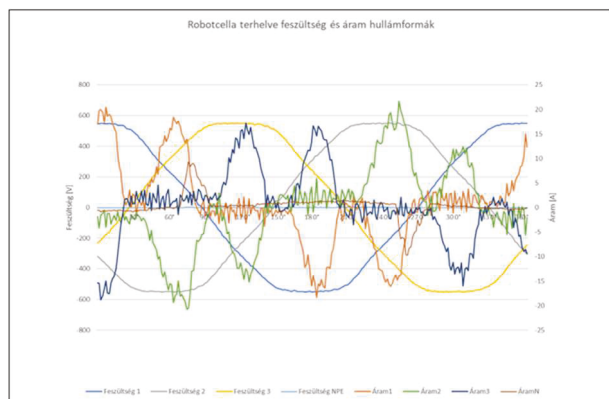


1. ábra. Gyártó berendezés torzított feszültség és áramhullámformák saját mérés alapján.

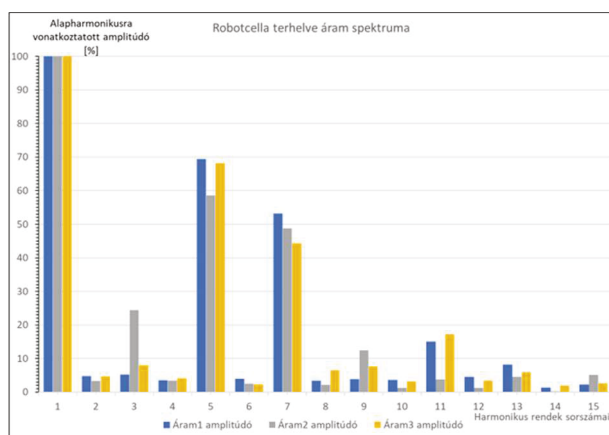


2. ábra. Gyártó berendezés áramhullámformájának harmonikus áramamplitúdó összetevői saját mérés alapján.

Egy másik példa az IEEE 519-2022 szabvány alkalmazására, egy ipari robot cella. A mért feszültség és áramhullámformákat a 3. ábra szemlélteti. Itt is elmondható, hogy a feszültség szinuszos, de az áram szinuszos már jelentős mértékben torzult. A 4. ábra szemlélteti az áram spektrumát, ami alapján az egyes harmonikusok torzítási értékeit olvashatjuk le. A robot cellának a közös csatlakozási ponton (PCC) mért teljes áram harmonikus torzítása $THD=99,19\%$. Ebben az esetben is az áram teljes harmonikus torzításának megengedett maximális értékét a teljes áram-igény szerinti harmonikus torzítás, a TDD értéke adja meg. A közös villamos hálózati csatlakozási Pont (PCC) zárlati árama $I_{SC}=800A$, a robot cella terhelő árama $I_L=8,3A$. A keresett arány $800A / 8,3A=96,38$. Az IEEE 519-2022 szabvány által javasolt megengedett legnagyobb teljes áram-igény szerinti harmonikus torzítás (TDD) 12% . Ezért a $THD=99\%$ a megengedett érték több mint nyolcszorosa. Vizsgáljuk meg itt is a harmonikus határértékeket rendek szerint. A $96,38$ arányszám alapján 2-11. 10%, 11-17 rendszámig pedig 4,5% a megengedett amplitúdó. Ezeket a határértéket minden páratlan harmonikus rend esetében többszörösen túllépjük. Az 5. harmonikus (250Hz) $69,31\%$, a 7. (350Hz) $53,15\%$, a 9. (450Hz) $14,94\%$, de még a 15. (750Hz) is $5,17\%$.



3. ábra: Robotcella torzított feszültség és áramhullámformák saját mérés alapján.



4. ábra: Robotcella áram-hullámformájának harmonikus áram-amplitúdó összetevői saját mérés alapján.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben az áram és feszültség harmonikusok közötti különbségek bemutatásának a célja az volt, hogy igazoljuk az áram- és feszültségharmonikusok közötti különbségeket, melyik milyen hatással van a villamos energia minőségére és ezt a hálózat mely pontján fejt ki. Bemutattuk, hogy az áram- és feszültségharmonikusok egymással összefüggnek, de a hatásaik a hálózatra és a berendezésekre különbözőek lesznek. Megvizsgáltuk azt is, hogy ipari létesítményekben milyen szabványok alkalmazhatóak a maximálisan megengedett alapharmonikusra vonatkoztatott amplitúdók meghatározására. Természetesen az IEE 519-2022 szabványban is ajánlások vannak. Későbbi kutatásaink célja, hogy ipari berendezéseken végzett tesztek, mérések alapján igazoljuk ezeknek a határértékeknek a helyességét. Ennek érdekében egy változtatható terhelésű (mivel a harmonikus injektálás függ a terheléstől), nagyteljesítményű, nagy harmonikus áramokat injektáló nem lineáris berendezéssel közös PCC csatlakozási pontra kapcsolt eszköz paramétereit fogjuk vizsgálni. Azt szeretnénk megfigyelni, ha változtatjuk az egyes áramharmonikusok alapharmonikusra (50Hz) vonatkoztatott amplitúdóinak nagyságát, akkor ennek függvényében hogyan változik meg egy kapcsolóüzemű tápegység, vagy egy inverter kimeneti feszültsége.

6. IRODALOM

- [1] UNE EN IEC 61000-3-2:2019/A1:2021
<https://www.en-standard.eu/search/?q=IEC+61000-3-2> (2024.02.16.)
- [2] IEC 61000-3-12:2011+AMD1:2021 CSV
<https://webstore.iec.ch/publication/69084> (2024.02.16.)
- [3] McGranaghan, M., Beaulieu, G., Update on IEC 61000-3-6: Harmonic Emission Limits for Customers Connected to MV, HV, and EHV, 21-24 May 2006
<https://ieeexplore.ieee.org/document/1668668> (2024.02.16.)
- [4] IEEE 519-2022, IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems
<https://standards.ieee.org/ieee/519/10677/> (2024.02.16.)
- [5] Lowenstein, M. Z., Harmonic Current and Voltage Distortion, 2002
<https://www.ecmweb.com/content/article/20887165/harmonic-current-and-voltage-distortion> (2024.02.16.)