



Túróczi József (1954)
Okl. Erősáramú Villamos Mérnök

Túróczi és Társa
Erősáramú Mérnöki Iroda KFT
Tulajdonos



Túróczi Péter (1979)
GAMF Üzemmérnök

Túróczi és Társa
Erősáramú Mérnöki Iroda KFT
Ügyvezető

Harmonikus zavarok, mint a villamosítás ellensége

A vasútvonalak villamosítása gyakori ütközést okozott az Áramszolgáltatókkal, mivel a szerelvény indításakor megengedett 250V-os potenciálemelkedés zavarta az elosztóhálózatok érintésvédelmi földelését. Azután megtanultuk kezelni, megszoktuk, hogy ezzel együtt kell élni mindaddig, míg meg nem jelent a vontatási rendszerben a teljesítmény elektronika...

A következő ütközés az új tarifarendszer bevezetése volt 1991.-ben. A vasúti vontatás során meg kellett ismerkedni két fontos feltétellel, a meddőenergia költség megjelenése mellett a Szolgáltatói minőségbiztosítást megkövetelő **MSz EN 50.160** szabvány elvárásaival.

Az első ütközés a Budapest-Szombathely vasút villamosítás során történt, mivel a Szolgáltató megkövetelte a mozdonyokra szerelt teljesítmény elektronika – összefoglaló néven nemlineáris elem – által generált harmonikus zavarok kompenzálását. A gépészeti főosztály akkori vezetőjével, Farkas László úrral vizsgáltuk a kompenzálás módját, azonban csődöt mondtunk. Az akkori technológiával megvalósított harmonikus zavaroszűrő értéke csillagászati, a megépített passzív szűrő megbízhatósága kritikán aluli volt. Mind ezt tetőzte, hogy a passzív szűrő kondenzátorai – ha nem volt szerelvény a közelben – annyi kapacitív meddő energiát termeltek, melynek büntető költsége miatt a verdikt gyorsan megszületett, a passzív szűrőket ki kell kapcsolni.

Az élet közben nem állt meg, a fejlődés folyamatos volt. Megjelentek a részben már harmonikus szűrővel is felszerelt mozdonyok, illetve az IGBT rendszer egy nagyságrendet csökkentett az aktív szűrők értékén. Korábbi partnerünk, a finnországi Nokian Capacitors Oy már 2007.-ben bemutatta a villamos vontatáshoz tervezett, 2MVA egység teljesítményű aktív szűrőit. Dubaj és a Koreai vasúti társaság azonnal vevői lettek, a próba vonalak kiválóan teljesítettek. Sajnos a cégek felvásárlási hullámai a finn partnereinket sem kímélték, a fejlesztések megrekedtek.

Társaságunk a munkája során kénytelen volt szembenézni két, a harmonikus zavarok értelmezését jelentősen befolyásoló eseménnyel:

- hajlandók vagyunk elfelejtkezni, hogy a felhasználókat más szabványok- és ajánlások, pld. az **MSz EN 61.000-4-30**; a **HD60234** - korábban az **MSz EN 2364** - és a **G5/4** szakmai előírásai is szabályozzák
- munkáink során megdöbbenéssel szembesültünk, hogy a műszerfejlesztők – vélhetően a processzor teljesítmény igény, a lebegőpontos számítási terhelés csökkentése érdekében – a Fourie sort műszakilag „egyszerűsítették”, a 0. harmonikus, a DC komponens mérését törölték

Az elmúlt évek fejlesztései, 20 évet meghaladó munkáink - közte a Budapest Airport – komplex, valamint a LED és a DML lámpák vizsgálatait során rá kellett jönnünk, az erősáramú hálózatok védelmének alapja, az EPH rendszer került potenciális veszélyhelyzetbe.

Emlékeznek Önök **Guadalajara** nevére?

Ez a kis mexikói városka 1992. Április 22.-én bekerült a tragédiák helyszíné közé. A település közelében - hibás termékválasztás miatt - két különböző anyagú, cink bevonatú víz- és a bevonat nélküli acél benzinszállító csővezetékek között a nedves földben elektrolitikus korrózió alakult ki. Az korrózió hatására kilyukadt vezetékkel a benzin a csatornába szivárgott, majd a benzingőz berobbant. Az órákon át tartó, egymást követő robbanások pusztítása több mint 200 ember halálát, utcákat, gyakorlatilag egy teljes városnegyedet döntve romba.

Ezt a pusztítást az $U_e \sim 330\text{mV}$ potenciálkülönbség okozta. Biztosan Önök is tapasztalták, hogy a korszerű, automata rendszerű ÉV műszerrel készített mérések során gyakran találkozunk az „**Error! A földpotenciálon 65Hz-nél nagyobb frekvenciájú zavar!**” üzenettel, mely akadályozza a mérést.

Mit is jelent ez?

A szimmetrikus háromfázisú rendszerben a hárommal osztható és a 0. rendszámú komponensek alapvetően a nulla vezetőben terjednek, ott, valamint a transzformátor állomás csillagponti földelésén – mely a DC – 2.500Hz tartományban már impedancia és nem ohmos ellenállás – ismeretlen mértékű potenciálemelkedést okoz.

Más fogyasztóknál, valamint Önöknél több állomáson, részben munkatársaival párhuzamosan végzett vizsgálatok - tapasztalatai alapján az Önök technológiai rendszere is zavarkibocsátónak bizonyult. Méréseink helyességét 2014.-ben az Önök munkatársai párhuzamos méréssel ellenőrizték.

Mi akkor a probléma? Miért beszélünk potenciális veszélyhelyzetről?

Sajnos a harmonikus zavarok esetében komoly értelmezési hiba tapasztalható. Az 1991.-es évi Áramszolgáltatói privatizáció során bevezetésre került az **MSZ EN 50160** szabvány, azonban ez csak és kizárólag az átadási ponton a szolgáltatás megfelelőségére nyújt előírásokat. Az Energia Hivatal ugyan előírta, hogy a felhasználói zavarkibocsátás nem lehet több mint a mért érték $1/5$ -e, na de ki állít le egy termelő rendszert, egy induló szerelvényt azért, hogy a 20%-os változást mérje- és bizonyítsa?

Kisfeszültségen pontosan definiálva a **HD 60234** - korábban az **MSz EN 2364** - és a **G5/4** szakmai előírásai is szabályozzák az utólagos ellenőrzést, de szeretnénk látni azt a beruházást, ahol a működés indítása után – szükség esetén – újra tervezik és építik a villamos energiaellátást.

Létezik viszont a kibocsátóra vonatkozó előírás is, ez az **MSz EN 61000** szabványsor. E szabványban az $I_{\Sigma 3F} \geq 16A_{\text{eff}}$ értéket meghaladó csatlakozású berendezések áramaiban a harmonikus zavarok arányát a **THD(i) $\leq 10\%$** értékben határozták meg. Ez a szabvány – épp úgy, mint a korábban hivatkozott **HD 60234** – a vizsgálat során tudatosan nem zárja ki a kisfeszültségű hálózat nulla-, illetve EPH vezetőjének vizsgálatát. Az okot már ismerjük, a **DC és a hárommal osztható komponensek alapvetően a nulla vezetőben terjednek, mely a transzformátor állomás(ok) csillagponti földelésén, ezzel együtt az EPH rendszerében, így a hálózat nulla vezetőjén ismeretlen mértékű potenciálemelkedést okoznak.**

Egyik vizsgálatunk során sikerült megbizonyosodnunk, a félelmünk valós. A transzformátorok csillagponti potenciálemelkedése az EPH hálózaton kiegyenlítő áramokat indított meg. A földalatti EPH összekötések egyike - vélhetően - laza volt, a kötés két oldalán a hivatkozott Guadalajara-i eseménynél zavart okozó elektrolitikus korrózió értékének többszörösét elérő potenciálkülönbség alakult ki, emiatt a földalatti EPH vezeték fém szerkezete több 10m-es szakaszon egyszerűen „eltűnt”!

Emlékeznek még Önök a régebbi, pld. a SzAMKAsM, SzAMKAt(V)M, SzAQrKM stb. kábelek köpeny hibáira? Egy-egy kábelhiba esetén akár több 100m-t meghaladó mértékű köpeny eltűnésénél a hiba okaként az akkori gyártási minőséget-, vagy a korrozív talajvizet definiáltunk. Tehettük, hiszen dr. Kádár Aba úr könyvei még a '90-es években is a harmonikus zavarokat a „van ilyen is” kategóriába sorolta, szemléletét az IBM székesfehérvári tapasztaltak alapján segítettünk módosítani.

Megértve a potenciál eltérések okát, a nulla- és az EPH hálózaton mérhető harmonikus zavarokat 50%-ban már meg is ismertük a veszélyforrást. A másik 50%-ról még nem beszélünk, pedig ismerjük, ez nem más, mint a rendszerben történő gondolkozás, a komplexitás fogalma.

Az erősáramú szakemberek hajlamosak egy-egy transzformátorállomásról ellátott fogyasztók gondjait lokális - önálló – problémaként kezelni. Elfelejtjük, hogy a **nulla-, illetve az EPH potenciál mindig azonos(!), minden földelt fémszerkezetet, ami a 20m-es potenciál tölcserén belül van, azonos potenciálúnak tekintünk még akkor is, ha azok nincsenek láthatóan, fémesen összekötve.**

Nem véletlenül hangsúlyozzuk a láthatóságot!

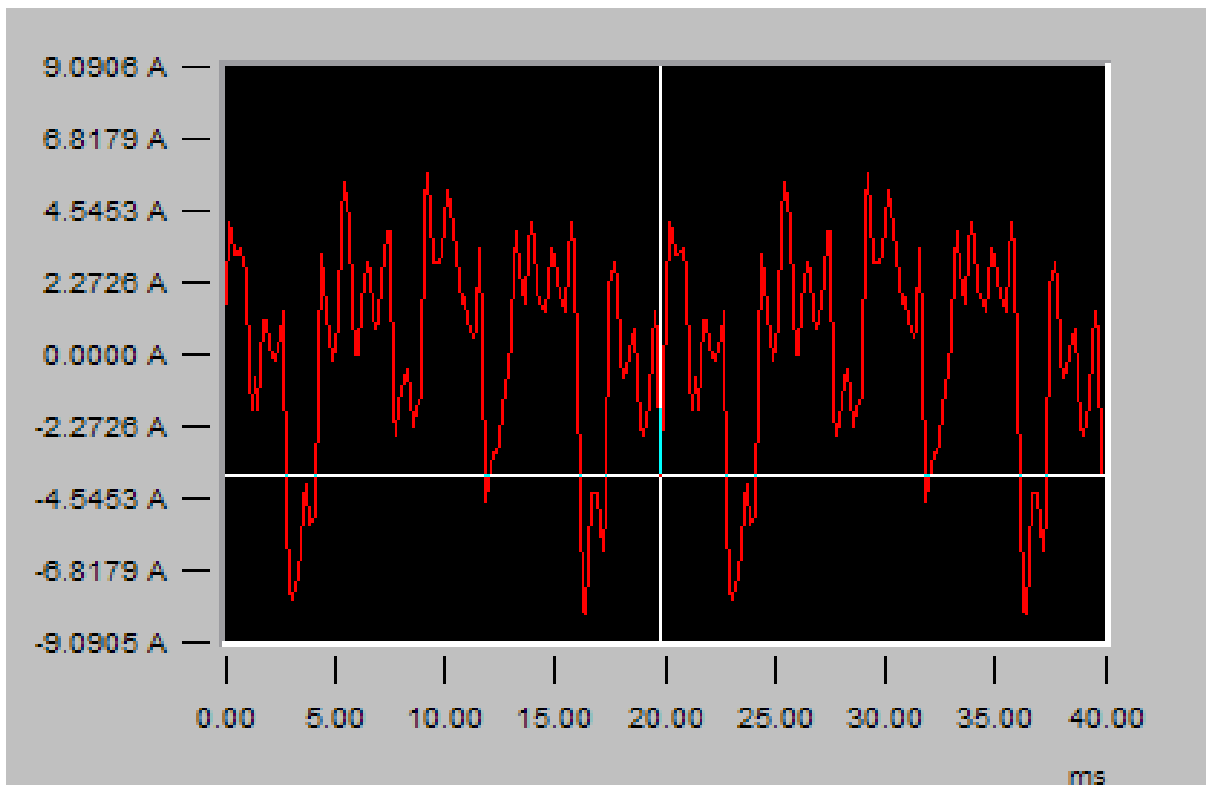
A föld alatt a kis- és középfeszültségű kábelek fém köpenyén, árnyékoló szalagokon- és ereken túl olyan szerkezetek is lehetnek – pld. víz-, gáz-, postai vezetékek, védelmi-, jelző- és működtető, esetleg optikai-, vagy informatikai kábelek, földalatti műtárgyak szerkezeti elemei stb. – melyeket potenciál befolyásolóknak kell tekintenünk.

Lakott területen belül lassan már nem található olyan pont, amelynél ne bizonyosodna be, hogy a potenciál tölcserén belül ismeretlen fémszerkezet található, de ez a komplex kezelésnek csak az egyik oldala. Rendszeresen elfelejtjük, hogy a nemlineáris elemeket - mint zavarkibocsátó eszközöket - is komplex módon kell vizsgálni. Az egyik legnagyobb hiba, ha elfelejtjük, hogy **a frekvenciaváltók, áram átalakítók, szünetmentes áramforrások, az elektronikus teljesítményszabályozáson alapuló eszközök, valamint az energiatakarékos világítás elemei soha nem léteznek önmagukban.**

Bizony, az oly sokat dicsért energiatakarékos, kompakt fénycsöves, a LED, DML stb. világítás mindegyike domináns zavarforrás!

Szerepüket tudatosan emeljük ki, mivel ezeket az eszközöket a kicsi egységteljesítményük alapján lebecsüljük. A hatásos egységteljesítmény tényleg alacsony értékű, azonban a látszólagos teljesítmény - típustól függően - akár egy nagyságrenddel magasabb lehet! Hangsúlyozzuk az egységteljesítményt, mivel a világítási lámpatestek száma egy-egy állomáson akár több 1.000db is lehet!

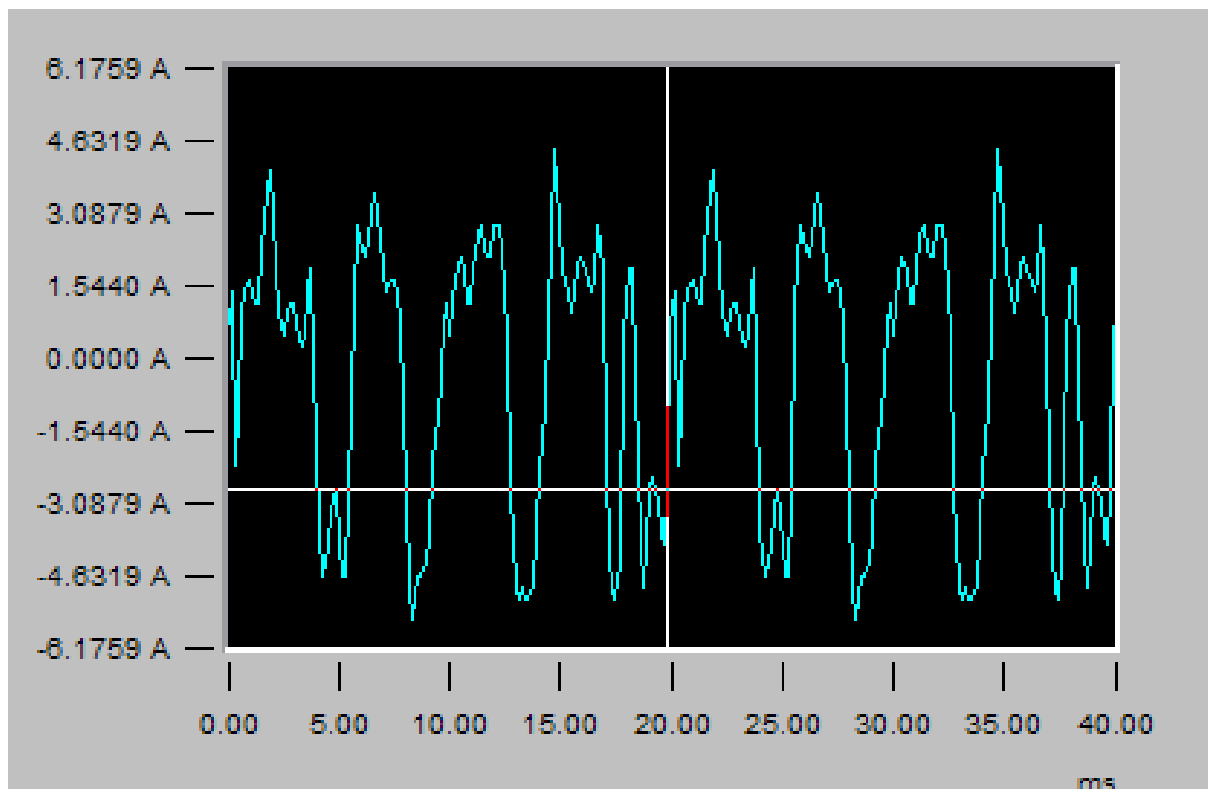
Nézzünk meg egy LED-es térvilágítás konkrét zavarvizsgálati mérési eredményét:



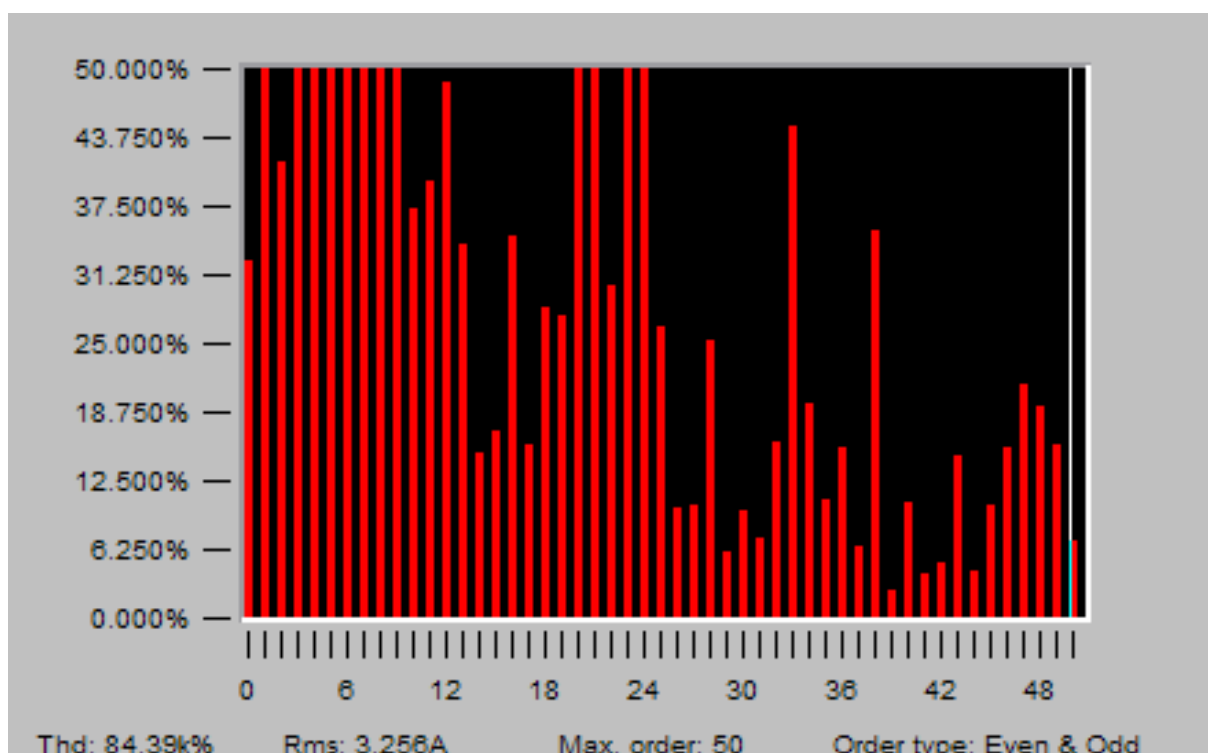
Látva a leágazási fázisáram jelalakját két kérdés azonnal felmerül:

- hol a két periódus, mely a $t = 40\text{msec}$ -os vizsgálati idő mellett $f = 50\text{Hz}$ -nél lenne látható?
- miért tolódott el az áram nulla átmenete ilyen jelentős mértékben?

Vizsgáljuk meg ugyan ennek a leágazásnak a nulla vezetéki áramát is, mely a háromfázisú, közel szimmetrikus terhelés ellenére a fázisáram effektív értékével közel azonos.



Térjünk vissza és nézzük meg most a fázisáramok spektrumát:



Mivel még a 48. harmonikus rendszámú zavarösszetevő is 20%-os mértékű, deklarálnak, hogy **kompenzálásra csak négy vezetékes zavarűrés alkalmazása célszerű, miközben a fázisáramok harmonikus zavarkompenzálását a DC – 50. harmonikus rendszám teljes spektrumában biztosítani kell!**

A védekezés meghatározásához az 50. rendszámnál történő hatékonyságot kell figyelembe venni. Mivel a periódusidő $f = 50\text{Hz}$ -nél $t = 20\text{msec}$, gyorsan adódik, hogy az 50. harmonikus – $f = 2.500\text{Hz}$ – esetében a periódusidő $t = 0,4\text{msec}$! A hatékony beavatkozáshoz egy nagyságrenddel nagyobb sebességű kompenzálásra van szükség, így deklarálható, hogy a védekező eszköznek $t_d \leq 40\mu\text{sec}$ késleltetésű beavatkozási sebességgel kell rendelkeznie.

Összegezve kijelenthetjük, az elektronikus teljesítményszabályozás terjedése korunk legnagyobb veszélye, mely az erősáramú villamosenergia ellátás üzembiztonságát veszélyezteti. A teljesítmény elektronikus beavatkozás gyors terjedése széles sávú, $f = \text{DC} - 2.500\text{Hz}$ tartományban hatékony kompenzálást igényel, így a passzív szűrők, mint kompenzáló eszközök alkalmazása - alkalmatlanságuk alapján - kizárható.

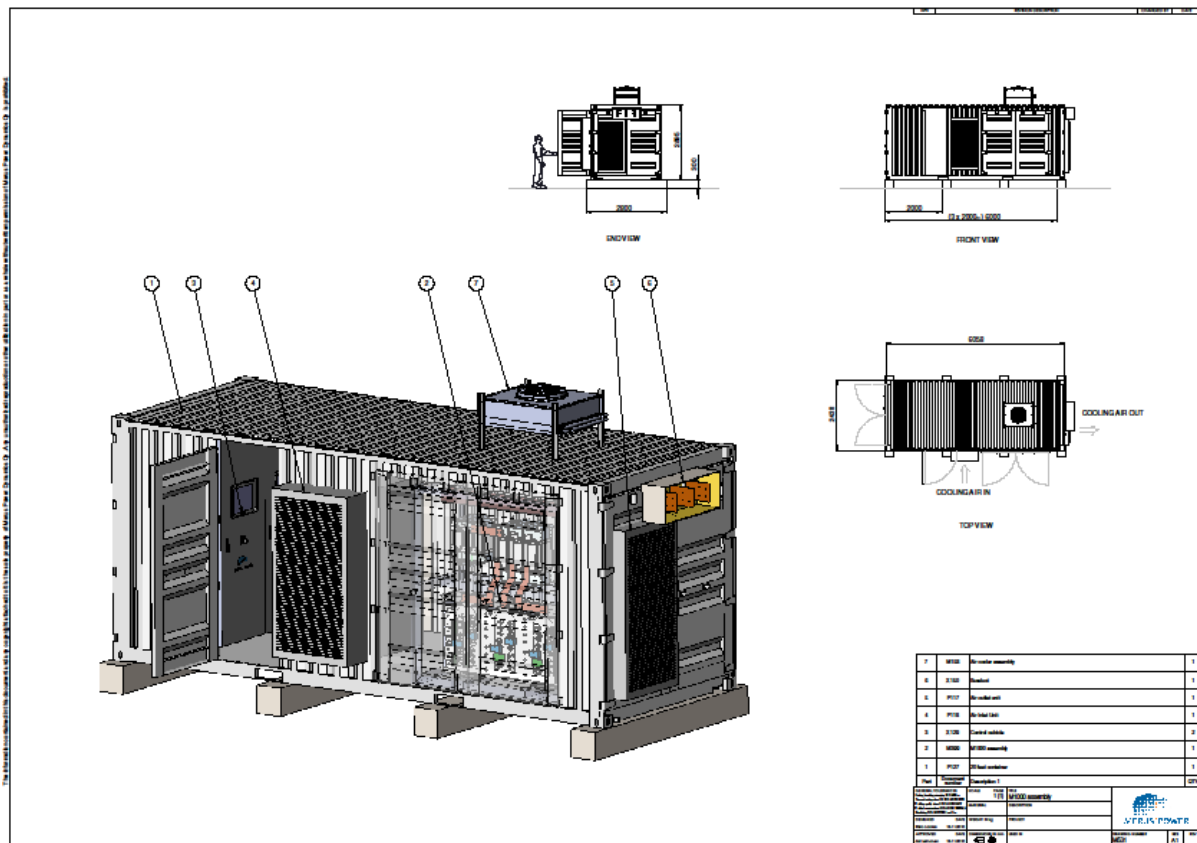
Társaságunk a Merus Power Dynamics Oy (Suomi) elektronikus zavarszűrői paramétereit oly módon kezdeményeztette megváltoztatni 2010.-ben, hogy annak működési – beavatkozási – sebessége szelektív üzemmódban

$$t_d \leq 10\mu\text{sec}$$

az elmúlt öt év hazai gyakorlata bizonyította alkalmasságát.

A MERUS® aktív harmonikus szűrő 0,4kV-os feszültségszinten, négy vezetékes beavatkozás-, modulárisan legfeljebb hét (7) egységre bővíthető kialakítás és egységes, 0,6*0,6m-es alapterület igénye mellett az $I_H = 50 \div 200A_{\text{eff}}$ fázisárami, illetve ennek 3*-val, mint nulla vezetéki kompenzáló árammal, azaz kb. $S_H = 35 \div 140\text{kVA}$ kompenzálási egység teljesítménnyel rendelkezik.

Természetesen létezik közép feszültségű változat is, ahol a moduláris kompenzálási teljesítmény már $S_H = 1.350\text{kVA}$, de ez a teljesítmény is bővíthető és akár önálló – kültéri – kialakításban is szállítható.



Végezetül foglaljuk össze azokat a feladatokat, melyeket az erősáramú hálózaton terjedő zavarok kompenzálása során kell kielégítenünk:

- a legfontosabb, legyünk tisztába azzal, hogy az elektronikus teljesítményszabályozással, kapcsolóüzemű tápegységgel felszerelt eszközök mindegyike harmonikus zavarkibocsátó
- soha ne becsüljük le a nemlineáris eszközök befolyásoló képességét, „fantom” – nem azonosítható – hibák esetén első gondolatunk a harmonikus zavarok felderítését célozza
- ne felejtjük el, soha nem egy zavarforrásról, hanem a zavarforrások egymásra hatásáról, így a zavarok pozitív visszacsatolására – gerjedést – alapuló eseti felerősödéséről beszélhetünk
- ahogy a zavarforrások, úgy a harmonikus zavarok is csak komplexen vizsgálhatók. Miközben az áramok zavartartalma nélkül a feszültségek torzulása értelmezhetetlen, négyvezetékes rendszerben a nulla – PEN - vezetéki áram figyelmen kívül hagyása is hibás eredmény mutat!
- a vizsgálatok során soha ne feledkezzünk a vizsgálati határok helyes megválasztásáról. Méréstechnikai „ökölszabály”, a jó méréskor alkalmazott műszer felbontásának legalább kétszeresének kell lenni az értékelési határértéknek! A háromfázisú rendszer THD() 0.-25. rendszámú vizsgálatához **IT érintésvédelemnél hat (6), TN – földelt - esetben hét (7)** csatornás, szinkron vizsgálat szükséges a 0.-50. harmonikus rendszámú tartományban
- igazolt zavarkibocsátás – $\Delta\text{THD}(u) \geq 1,6\%$ és/vagy a $\text{THD}(i) > 10\%$ mind a fázis-, mind a nulla vezetéki áramok esetében – esetén keressük a teljes spektrumon belül a primer, szekunder és a tercier dominancia értékeket is
- fázisáramok esetén a dominancia primer értéke általában a 3.-9.; a szekunderé a 27.-35., míg a tercier érték a 39.-50. rendszámú tartományban jelentkezik, de - az egymásra hatás mértékétől függően - ezek a határok akár teljesen összeolvadhatnak
- a komplex mérési adatokból súlyozással határozzuk meg a domináns zavarforrásokat, ahol a kompenzáló teljesítmény meghatározás során – mivel mérési időszakunk mindig korlátozott – felfelé kerekítve, biztonsági tartalék figyelembevételével számoljunk
- a kompenzáló eszköz kiválasztásánál újból a méréstechnikai „ökölszabály” alkalmazása célszerű. **A kompenzálás akkor hatásos, ha a beavatkozás sebessége egy nagyságrenddel gyorsabb, mint a kompenzálni kívánt harmonikus rendszám.** Látható, hogy egy általános, kb. 3-400 μ sec sebességű eszköz hatékony beavatkozása csak a 2.-13., esetleg még a 15. rendszámig terjedő tartományban várható
- négyvezetékes kompenzálás esetén a nulla vezetékben igen magas lehet az egyenáramú, a DC összetevő aránya. Mivel a potenciálemelkedésen belül ez felelős az elektrolitikus korrózió kialakulásáról, kompenzálása szükségszerű, de erre – gyakorlati tapasztalatunk szerint - csak a nagysebességű berendezések alkalmasak
- végezetül mindig ellenőrizzük le, hogy a beüzemelt, új berendezésünk hatásos kompenzálást végez, tehát a kiindulási méréssort – a működő kompenzálás mellett - meg kell ismételni

Látszólag nem ide tartozik, de még is kell beszélnünk a fázisjavító berendezések alkalmazásáról.

A fázisjavító kondenzátor közömbösíti a hálózat induktív – a frekvenciával arányosan emelkedő ellenállású - összetevőjét, viszont emiatt növekszik a hálózati egymásra hatás jelentősége. Magas veszélyeztetési szint esetén – gyors beavatkozás – kikapcsolatjuk a kondenzátorokat, hatására a harmonikus zavartartás mértéke gyorsan csökken.

Sajnos, mint minden szakterületen, itt is megjelennek a „túlképzett” szakemberek. Ők ajánlják az ún. „torló-fojtó” rendszerű statikus fázisjavítás alkalmazását a felharmonikus szűrő helyett! Elfoglaltságunk kizárására vizsgáljuk meg a torló-fojtó fázisjavítás harmonikus szűrőként való alkalmazhatóságát a műszaki tartalom, illetve a meddőkompenzálás működési elve alapján:

Az erősáramú fázisjavító berendezésekben **a statikus kondenzátorok előtt az induktív elemek alkalmazásának célja kizárólag a statikus kondenzátortelemek védelme a felharmonikus rendszám által meghatározott magasabb frekvenciájú jelek károsító hatása ellen.** Az így kialakított soros L-C elem a méretezett, ún. „törésponti” frekvencia értéke - pld. a 14%-os és a 7%-os szűréshez tartozó 139(141)Hz, illetve 189Hz - alatt, így a hálózati 50Hz-en vizsgálva kapacitív, ennél magasabb frekvencia esetén induktív jelleget mutat.

Mivel **a fázisjavító berendezés kondenzátorainak bekapcsoltsága kizárólag a mindenkori terheléshez tartozó, a feszültség- és az áram vektorok közötti elfordulás függvénye,** melynek mért értéke az $f = 50\text{Hz}$ -es rendszer frekvencián mért – általában vonali feszültség- és a nem hozzá tartozó fázisáram – **vektorok szorzatának eredménye. Az alapvektor helyzete azonban csak és kizárólag a feszültség- és az áram vektor elfordulásra utal, de nem hordoz érdemi információt a harmonikus vektorok gyors változású helyzetéről- és értékéről.**

Egyszerű példaként, ha vizsgálunk egy reális, pld. $\cos\phi > 0,97$ induktív paraméterű - a nem-lineáris elemek jelentős része enyhén kapacitív fogyasztói berendezés - villamos erőátviteli hálózatot. A jó minőségű – kompenzált - hálózat azt jelenti, hogy a zavarok csökkentését biztosító induktív összetevők jelentős része már hiányzik, a zavarok jelentős csillapítás nélküli hálózaton terjedhetnek. Példánk tehát kissé szélsőséges, de reális üzemállapotot feltételez. Visszatérve a fojtózott fázisjavításra, amennyiben tehát – mint példánkban - a teljesítménytényező értéke megfelelő, a fázisjavító berendezésben kompenzálsági fokozat bekapcsolása nem szükséges. Amennyiben nincs szükség a fázisjavító egységek – a fojtótekerccset tartalmazó leágazások - bekapcsolására, de akkor mitől lennének ezek az elemek felharmonikus szűrők?

Tekintettel arra, hogy **a standard fázisjavító berendezés kondenzátorai az adott típusra, felépítésére jellemző módon pozitív visszacsatolást, azaz gerjedést okozhatnak, ezért alapszabály, hogy aktív harmonikus szűrő és a fojtózás nélküli, standard kivitelű fázisjavító berendezés egy áramköri rendszeren belüli alkalmazása műszakilag ellenjavalt, gerjedési veszélyt rejtő műszaki megoldás!**

A fentiek és 600-nál több mérés tapasztalatai alapján **az aktív harmonikus szűrők alkalmazására három alapszabályt** fogalmazhatunk meg:

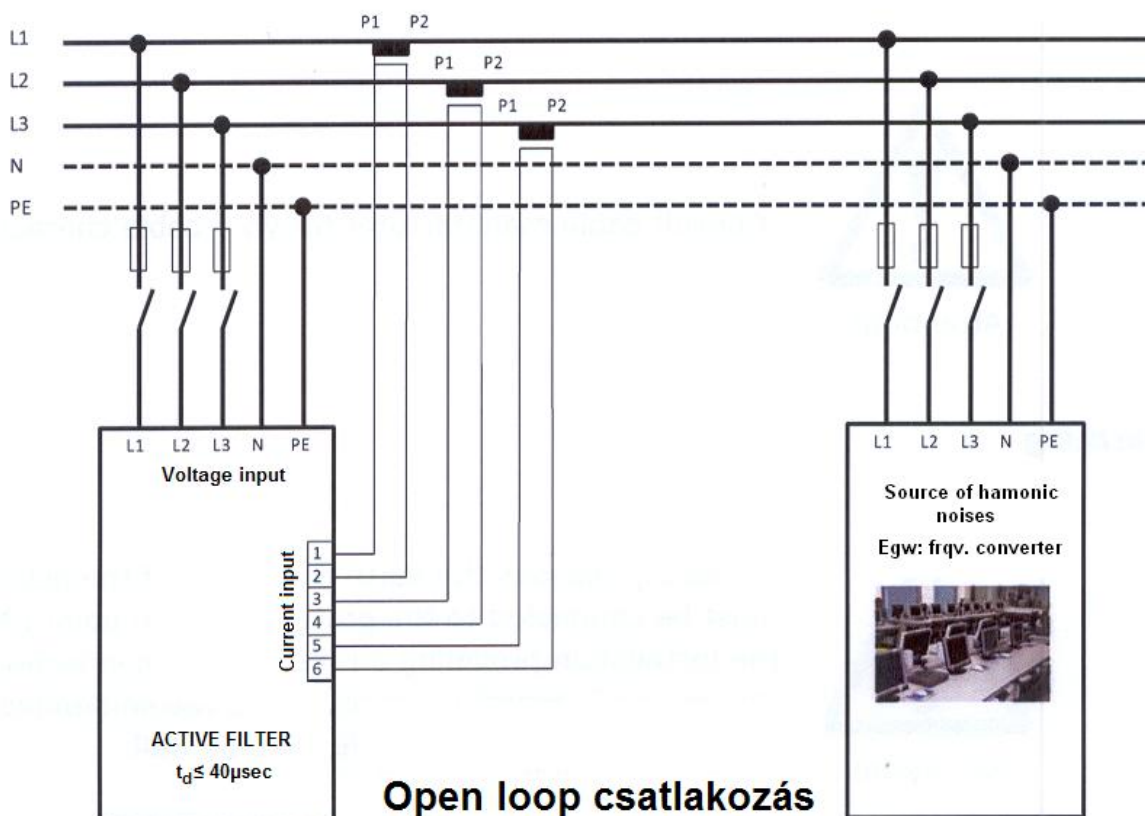
- az **aktív harmonikus szűrő telepítése esetén** – ha szükséges – kizárólag az ún. „torló-fojtó” rendszerű statikus fázisjavító berendezést tartalmazó egység alkalmazható, mivel a statikus kondenzátorok reflexióképző elemként jelennek meg az erősáramú elektromos hálózaton
- korszerű berendezés esetén akár maga az aktív harmonikus szűrő is alkalmazható az alábbi képlet szerint

$$I_{\text{Eredő}} = \sqrt{I_{\text{Harmonikus}}^2 + I_{\text{Meddő}}^2}$$

- általánosságban érvényes, hogy a **gyors, $t_d \leq 40\mu\text{sec}$ sebességű, kisfeszültségű alkalmazás esetén** csak **négy (4) vezetékes**, a nulla vezetékben a fázisvezetők kompenzálsági áramának összegét(!) kompenzálni tudó aktív szűrőt célszerű választani.
- A csak fázisvezetőkben kompenzálni tudó három (3) vezetékes szűrők kizárólag ott alkalmazhatóak, ahol a nulla vezetői áram kizárható, pld. a középfeszültségű rendszerek esetében
- a **gyors, $t_d \leq 40\mu\text{sec}$ sebességű, kisfeszültségű alkalmazás esetén** felmerül még egy probléma, ez pedig a beavatkozó egység vezérlési sebessége. A pontos vezérlés érdekében csak az ún. „open loop” – következő kép – szerinti bekötés alkalmazása javasolható

Power supply

Load ->



Open loop csatlakozás

Tisztelt Kollégák!

Megköszönjük szíves figyelmüket, egyben 20 éves gyakorlati, üzemeltetési tapasztalataink alapján várjuk megkeresésüket minden olyan esetben, ha szenvedőivé válnak az egyébként hasznos berendezés, az elektronikus teljesítményszabályozás mellékhatásának, a harmonikus zavarok okozta problémáknak.

Felhívjuk szíves figyelmüket, hogy Társaságunk tevékenységéről, szolgáltatásairól-, valamint a Társaságunk által forgalmazott termékekről- és referenciáinkról részletes leírás- és adatszolgáltatás található a www.ttemi.hu honlapunkon.

Természetesen készülékeinken túlmenően felmérésekkel, tanácsadással, valamint a villamos hálózatoknak az érvényes szabványok előírásainak megfelelő **állapot felmérő- és rögzítő, valamint analízáló béméréssel, erősáramú, közép- és kifeszültségű hálózatok, elosztók- és átalakítók (transzformátorok), INDUSTRIA kiállításokon TÖBBSZÖRÖSEN kitüntetett fázisjavító berendezések és felharmonikus szűrők tervezésével és kivitelezésével** állunk rendelkezésükre.