

Sodronyok frekvenciafüggő átviteli jellemzőinek vizsgálata a 2 – 150 kHz tartományban

A 2 – 150 kHz frekvencia tartomány jelenleg is egy szabályozatlan sávot jelent elektromágneses összeférhetőség szempontjából. A kérdéses tartományban nincsenek zavarkibocsátási szintek, zavartűrési szintek pedig csak a váltakozóáramú táplálási kapukra vannak. Ebből adódóan a kompatibilitási szintek nem definiáltak (vagy csak egyes termékszabványokban), így az elektromágneses összeférhetőség sok esetben nem valósul meg a készülékek, berendezések között. Cikkem a fenti anomália kapcsán az érintett készülékek közti csatlósi út (pl. transzformátor, sodrony) vizsgálatával foglalkozik, mely elengedhetetlen a zavarterjedés jobb megértéséhez.

Nowadays, the 2-150 kHz frequency range is an unregulated range from the electromagnetic compatibility point of view. Immunity and emission levels, limits are not defined (except some product standards), thus electromagnetic compatibility is not come true between equipment and devices. My paper deals with the above mentioned topic. It shows the transfer characteristics of stranded conductors and transformers including my laboratory measurements which is important to understand how the disturbances spread between the electrical equipment.

Kulcsszavak: Elektromágneses összeférhetőség, vezetett zavar, 2 – 150 kHz frekvenciatartomány, sodronyok átviteli jellemzői

1. BEVEZETÉS

A 2 – 150 kHz frekvenciatartomány elektromágneses összeférhetőség szempontjából eddig egy szabályozatlan sávot jelentett [1]: sem zavarkibocsátási, sem zavartűrési határértékeket nem definiáltak az említett tartományban. Ennek oka, hogy egészen az utóbbi évtizedig nem volt olyan alkalmazás, amely ezt a frekvencia tartományt hasznosította volna.

Az utóbbi évtizedben azonban a teljesítményelektronika fejlődésével egyre több olyan berendezés (pl. hálózati inverter) kerül a hálózatra, amelyeknek zavarkibocsátása (pl. kapcsolási frekvenciájának felharmonikusai) a kérdéses frekvenciasávba esik. Az elszámolási villamos fogyasztásmérők távleolvasásához külföldön széles körben alkalmazott keskenysávú PLC technológia vivőfrekvenciái szintén a 2 - 150 kHz-es sávot használják az adatok továbbítására. Fontos megemlíteni azt a tényt is, hogy a szóban forgó

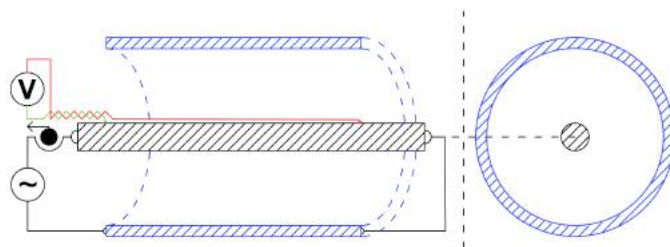
frekvenciasáv EMC szabványosítása hiányos, nem befejezett folyamat. Alapvetően e három tény tette lehetővé olyan EMI problémák felbukkanását a 2-150 kHz frekvenciatartományban, mint például a fényerő szabályozható (dimmelhető) lámpák véletlen ki-be kapcsolása, helytelen PLC kommunikáció, okos mérők relatív mérési hibáinak osztálypontosságot meghaladó befolyásolása [2].

A fent említett három tény együttesen vezetett az évtized legnagyobb mértékű kompatibilitási problémájához: Svédországban 2009-re az összes (körülbelül 5 millió) hagyományos Ferraris elvű fogyasztásmérőt lecserélték okos, kétirányú kommunikációt biztosító fogyasztásmérőre. Hamarosan kiderült, hogy a hálózati inverterek vezetett zavarkibocsátásuk révén jelentősen befolyásolhatják (15-100%) az elektronikus/okos mérők pontosságát, valamint a kommunikációs képességet is. A vizsgálatok eredményeként kiderült, hogy az okos mérők 8%-át azonnal, a többit pedig pár éven belül le kell cserélni. Annak oka, hogy a fent említett – és még sok más – interferencia jelenség létrejöhetett, egyértelműen a szabványosítás hiánya a 2-150 kHz frekvencia tartományban.

2. FELÜLETI IMPEDANCIA FOGALMA

Egy vezető impedanciája alatt általában a felületi impedanciáját értjük. A felületi impedancia általános definíciója [3] található, az ezzel kapcsolatos gyakorlati alkalmazások a [4] olvashatók. Egy csőszerű vezető esetén négy felületi impedancia értelmezhető annak függvényében, hogy külső vagy belső felületi impedanciáról beszélünk, illetve az áramvisszavezetés a cső belsejében vagy külsejében valósul meg. A sodronyok olyan speciális csőszerű vezetők, melyek közepe nem üreges, így itt csak egy felületi impedancia értelmezhető: külső felületi impedancia külső áramvisszavezetéssel. Ezt egyébként *belső impedanciának* is szokás nevezni, utalva rá, hogy ez a vezetőn belüli feszültségesés, valamint az átfolyó áram hányadosaként van definiálva.

A belső impedancia a sodrony felületén I áram hatására eső U feszültség és a sodronyon átfolyó I áram hányadosa. A felületi feszültség egy vékony, a sodrony felületére hosszirányban tökéletesen illeszkedő, de attól elszigetelt ún. felületi vezető segítségével mérhető.



1. ábra: Mérési elrendezés vázlatja

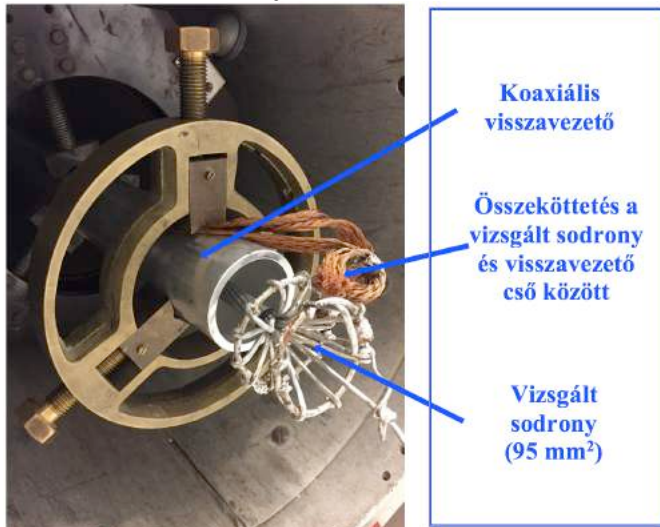
3. MÉRÉS

3.1 A mérési elrendezés megvalósítása

A mérési elrendezést a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszékének Smart Grid laboratóriumában található koaxiális visszavezető cső felhasználásával állítottuk össze. A mérési elrendezés vázlata a 1. ábrán látható. A fekete téglalap a vizsgált sodrony, a piros vonal a sodrony felületén elhelyezett felületi vezető, mely a sodrony távoli végéhez csatlakozik. Kék szín jelzi a koaxiális visszavezető csövet.

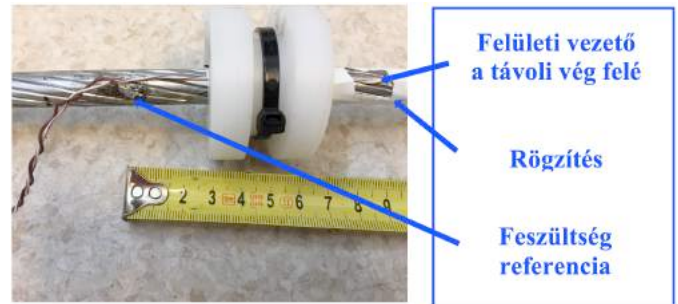
A mért sodronyt a visszavezető cső középvonalában helyeztük el. A visszavezető cső hossza 3,1 méter, belső átmérője 55 mm, külső átmérője 60 mm.

A mért vezetőt az elrendezés távoli végén összeköttöttük a visszavezető csővel. A mért végen a vizsgált sodrony és a visszavezető cső közé egy generátort, illetve azzal sorba kötött árammérőfejet illesztettünk az áram útjába.

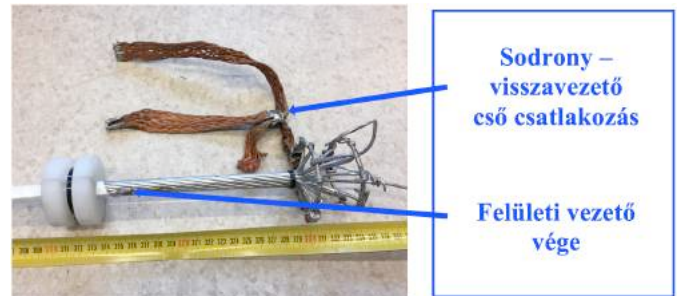


2. ábra: Összeköttetés a távoli végén

Az előkészítő fázisban a mért sodronyon egy felületi vezetőt helyeztünk el (piros szín a 1. ábrán, fehér vezeték a 3. ábrán). Ezt a vékony vezetőket a sodrony távoli végén a sodronyhoz forrasztottuk (lásd 4. ábra, „felületi vezető vége”). Megjegyzendő, hogy fontos a sodrony felülete, valamint a felületi vezető közti hézagot a lehető legkisebbre csökkenteni, mivel így csökkenthető a járulékosan mért külső impedancia értéke. A feszültségmérés referencia pontja a mért végen található (zöld szín a 1. ábrán, barna vezeték a 3. ábrán), ahol a referencia vezetőt szintén a sodronyhoz forrasztottuk. A referencia vezető, valamint a felületi vezető meghosszabbítását összesodortuk, és úgy vezetjük a feszültségmérő berendezéshez, ezzel is csökkentve a külső mágneses terek által beindukált feszültséget (lásd 1. és 3. ábra). Fontos megjegyezni, hogy a feszültségmérés hossza a két forrasztási pont közti távolsággal egyezik meg.



3. ábra: Az előkészített vezető mért vége



4. ábra: Az előkészített vezető távoli vége

Az előzőekben ismertetett mérési elrendezés összeállítása természetesen egy iterációs folyamat volt, melynek során folyamatosan módosítottuk a mérési összeállítást, így egyre pontosabb eredményeket értünk el. Az elrendezés fejlesztése jelenleg is zajlik, az itt ismertetett állapot a diplomatervem beadása előtti változat, azóta viszont történt néhány módosítás.

3.2 Felületi impedancia meghatározása

A sodrony felületi impedanciája a fent ismertetett elrendezés kialakítása után a következőképpen válik mérhetővé: ha a sodronyon egy adott nagyságú és frekvenciájú I áramot kényszerítünk át, kialakul egy U feszültség. Ez a sodrony felületén elhelyezett felületi vezető segítségével mérhető. A belső impedancia a 2. fejezet alapján a következőképpen számítható:

$$Z_b = \frac{U}{I}$$

, ahol U a felületi vezető és referencia pont között mért feszültség, I a sodronyon átfolyó áram. Megjegyzendő, hogy az összefüggésben szereplő mindhárom mennyiség fázor, így nem elég a feszültség és áram nagyságát mérni, a köztük lévő fázisszöveget is szükséges. A fázisszög ismeretében a belső impedancia valós és képzetes része, illetve a vezető belső induktivitása is számíthatóvá válik a következő összefüggésekkel:

$$R_b = |Z_b| \cdot \cos\varphi$$
$$X_b = |Z_b| \cdot \sin\varphi$$
$$L_b = \frac{X_b}{\omega} = \frac{X_b}{2\pi f}$$

3.3 Az elrendezés „kalibrálása”

Jelen fejezet ismerete ugyan nem szükséges a sodronyok felületi impedancia méréseinek megértéséhez, azonban érdemes pár szót ejteni a mérési módszer hibáiról, ezek meghatározásáról, valamint kompenzálásáról. A 3.2. fejezet alapján látható, hogy a felületi impedancia kiszámításához szükséges egy feszültség és áram nagyságának, illetve a köztük lévő fázisszög mérése. Még a felületi feszültség közvetlenül mérhető, az áram esetén egy mérőfej, illetve egy teljesítményerősítő is szükséges. A mérőfej az áram nagyságával arányos feszültség jelet állít elő, még a teljesítményerősítő ezt a jelet stabilan mérhető nagyságúra növeli. Az említett berendezések csak egy szűk frekvenciatartományban adják vissza a jelek amplitúdóját és fázisát számunkra kielégítő pontossággal. Ezen frekvenciatartománytól távolodva a mérőfej és erősítő által alkotott egység szöghibája meghaladja a megengedhető szintet, így ezt figyelembe kell venni az eredmények kiértékelése során. Ehhez meg kell határozni, hogy az egyes vizsgálati frekvenciákon mekkora a szöghiba értéke.

Az áram mérésére szolgáló mérőfej és teljesítményerősítő által alkotott rendszer szöghibája meghatározható, ha egy olyan elrendezés felületi impedanciáját mérjük meg, melynek eredményét – analitikus számításokkal – előre ismerjük. Ilyen például a tömör, kör keresztmetszetű vezető felületi impedanciája.

A mérési hiba ily módon történő meghatározásához egy 16 mm² AlMgSi1 tömör, kör keresztmetszetű vezetőt használtunk. Ennek felületi impedanciáját a vizsgálati frekvenciákon méréssel, illetve analitikus számításokkal is megállapítottuk. A mért, illetve a számított eredmények közti különbség megegyezik az adott frekvencián érvényes szöghibával. Ezzel a későbbi mérések eredményeit tehát korrigálni kell.

A szöghibavektor jóságát egy 10 mm² AlMgSi0,5 tömör, kör keresztmetszetű vezetőn ellenőriztük. Itt először a mérést végeztük el, majd korrigáltuk az előbbieken megállapított szöghibavektorral. Ezt vetettük össze az erre a vezetőre végzett analitikus számításokkal, mely jó egyezést mutatott.

4. EREDMÉNYEK

A 3. fejezet szerinti mérési eljárást eddig három sodronyon végeztük el. Jelen fejezetben bemutatom a mérés menetét a 25 mm² keresztmetszetű AASC sodronyra, továbbá megadom a kapott eredményeket a 25 és 95 mm² keresztmetszetű AASC sodronyra is.

4.1 DC ellenállás

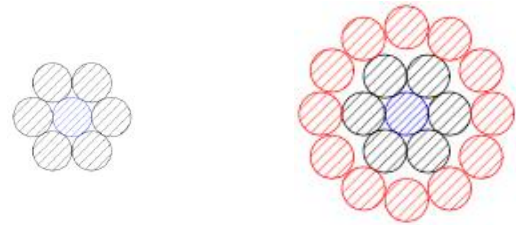
Az egyes sodronyok DC ellenállásai több gerjesztéssel is le lettek mérve. Az 1. Táblázat tartalmazza az eredményeket a 25 mm² AASC sodronyra.

1. Táblázat. DC mérés eredményei

I [A]	U _M [V]	R [Ω]	r [Ω/km]
4,95	19,5	3,94	1,23
6,75	26,7	3,96	1,24
9,9	38,8	3,92	1,23

Az átlagos hosszegységre eső ellenállás tehát 1,24 Ω/km.

A fenti eredmény egy egyszerű kézi számítással könnyen ellenőrizhető. Az 5. ábrán a 25 és a 95 mm² AASC sodrony keresztmetszeti képe látható.



5. ábra: 25 és 95 mm² AASC sodrony keresztmetszete

A 25 mm² AASC sodrony egy belső (kék), és hat külső elemi vezetőből (fekete) épül fel. A 95 mm² AASC sodrony ezenkívül egy harmadik elemi vezető réteggel is rendelkezik, melyben 12 elemi szál található (piros).

Egy belső elemi vezető ellenállása könnyedén számítható a jól ismert összefüggéssel:

$$R_b = \rho_{AASC} \cdot \frac{l}{A} = 24,66 \text{ m}\Omega$$

A külső elemi vezetők esetén figyelembe kell venni, hogy azok a belső elemi vezetőre adott menetemelkedéssel rá vannak tekerve, így egy bizonyos hosszúságú sodrony esetén a külső elemi szálak hosszabb utat járnak be, mint a belső. A külső elemi szálak ellenállását így az alábbi, menetemelkedést is figyelembe vevő összefüggéssel számíthatjuk:

$$R_k = \rho_{AASC} \cdot \frac{l}{A} + \rho_{AASC} \cdot \frac{l}{l_m} \cdot \frac{2r_m \pi}{A} = 26,69 \text{ m}\Omega$$

A fenti képletben l a vizsgált sodrony hossza (jelen esetben 3,16m), A az elemi vezető keresztmetszete, r_m a közepes sugár, l_m a menetemelkedés (az a sodronyhossz, melyen a külső elemi vezető egy teljes kört ír le a belső elemi vezető körül).

A 25 mm² AASC sodrony egy darab belső, illetve hat külső elemi vezető párhuzamos kapcsolásaként áll elő. Ezek eredő ellenállása:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_b} + \frac{6}{R_k} \rightarrow R = 3,77 \text{ m}\Omega$$

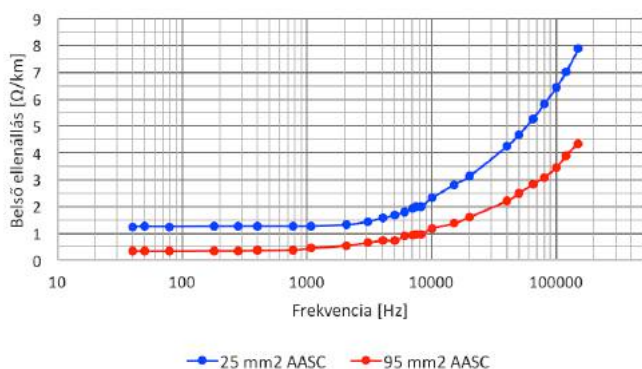
Normálva a hosszal:

$$r_{25,AASC} = \frac{R [\text{m}\Omega]}{l [\text{m}]} = 1,19 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

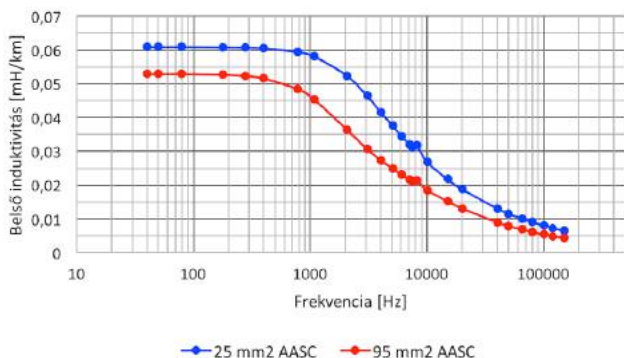
Látható, hogy a DC ellenállás mérési és kézi számítással kapott eredményei jól egyeznek egymással.

4.2 AC impedancia

A felületi impedanciát sodronyonként 26 frekvencia értéken mértük ki 40 Hz és 150 kHz között. A mérésekkel párhuzamosan készült a Tanszékünkön egy szimuláció is, mely az elemi vezetők módszerének felhasználásával, tisztán számítás útján határozta meg az egyes frekvenciákon mérhető felületi impedancia értékeit. A mérés és a szimuláció tehát egymás kölcsönös validációjára szolgált. Az eredményeket két sodronyra mutatom be, a 25, valamint 95 mm² keresztmetszetű AASC típusú sodronyokra. A belső ellenállás a 6. ábrán, a belső induktivitás a 7. ábrán látható.



6. ábra: A vizsgált sodronyok belső ellenállása



7. ábra: A vizsgált sodronyok belső induktivitása

Érdeemes megjegyezni, hogy az induktivitás esetén nem közvetlenül a belső, hanem egy látszólagos induktiváshoz jutunk csak, mely a belső és egy külső induktivitás összege. Ennek oka a sodrony felülete, valamint a felületi vezető közti távolság (mely praktikusán a felületi vezető sugarával egyezik meg). A külső induktivitás a következő összefüggés segítségével számítható:

$$L_{\text{külső}} = 0.2 \cdot \ln\left(\frac{r+v}{r}\right) \left[\frac{\text{mH}}{\text{km}}\right]$$

Ennek értéke a fenti két sodrony, illetve általunk használt felületi vezető esetén:

$$L_{\text{külső},25} = 0,0414 \text{ mH/km}$$

$$L_{\text{külső},95} = 0,0238 \text{ mH/km}$$

A mért induktitásból a járulékos külső induktivitást kivonva adódik a sodrony belső induktivitása. A 7. ábrán megadott eredmények ezt a korrekciót már tartalmazzák.

Megjegyzendő, hogy mindhárom sodrony esetén a szimuláció eredményei jól egyeztek a mérés eredményeivel, ezzel igazolva egymás helyességét.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

Látható, hogy a frekvencia növekedésével az egyes sodronyok ellenállásának aránya csökken. Például a 95 mm² és a 25 mm² sodronyok hosszegységre eső ellenállásának aránya ($R(f)_{25}/R(f)_{95}$) 40 Hz-en 3,46, még 150 kHz-en már csak 1,7, azaz több, mint a felére csökkent. A tipikus inverter kapcsolási frekvencia tartományban (10 – 20 kHz) ez az érték 1,95 – 1,85 között mozog. Megállapítható tehát, hogy a nagyobb frekvenciás áramharmonikusokkal szemben a kis keresztmetszetű sodrony sem jelent erőteljes csillapító hatást. Ennek oka, hogy nagyobb frekvenciákon a szkin hatás miatt az áram kiszorul a külső felület közelébe, így a sodrony „vezető része” a keresztmetszet helyett egyre inkább a kerülettel lesz arányos. Ilyenkor a vezetésben részt vevő keresztmetszet tömör vezető esetén a következő közelítő módszerrel számítható [5]:

$$A_{\text{vez}} \approx 2\pi r_0 \delta$$

, ahol:

δ az adott frekvencián érvényes behatolási mélység

r_0 a vizsgált vezető sugara

6. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **Bernd W. JAEKEL**: *Current situation in the frequency range from 2 to 150 kHz with regard to electromagnetic compatibility*, 22nd International conference on Electromagnetic, 2012 September
- [2] **CENELEC**: *CLC/SC205A Study Report on Electromagnetic interference between Electrical Equipment/Systems in the Frequency Range below 150 kHz*, Edition 3, October 2015
- [3] **CCITT DIRECTIVES** *Concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines – Volume III: “Capacitive, Inductive, and Conductive Coupling: Physical Theory and Calculation Methods”*, 1989, ISBN 92-61-04041-1
- [4] **CCITT DIRECTIVES** *Concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines – Volume II: “Calculating Induced Voltages and Currents in Practical Cases”*, 1989, ISBN 92-61-04041-1
- [5] **Simonyi Károly**: *Elméleti villamosságtan*, Tankönyvkiadó, 1967, 428. oldal