

Sodronyok impedanciájának meghatározása az elemi vezetők módszerével

Már néhány év eltelt azóta, hogy az első elektromágneses összeférhetőségi problémák jelentkeztek a 2 – 150 kHz frekvenciatartományban, azonban még mindig számos megválaszolatlan kérdés akadályozza a szabványosítás befejezését. Az egyik ezek közül, hogyan terjednek a szupraharmonikus zavarok a villamos hálózaton. Cikkünk a fenti kérdéskörhöz kíván közelebb kerülni a kisfeszültségű hálózatokon alkalmazott sodronyok átviteli jellemzőinek vizsgálatával, amely az előbb említett szupraharmonikus zavarok egyik csatolási útja. A vizsgálat a fizikai törvényszerűségek MATLAB szimulációján alapszik, amelynek eredményét a korábban végzett méréseinkkel is összehasonlítjuk.

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 cannot be ensured between equipment and devices. My paper deals with the above-mentioned topic. It shows the transfer characteristics of stranded conductors based on MATLAB simulations, which is important to understand how supraharmonic disturbances spread between the electrical equipment.

Kulcsszavak: elektromágneses összeférhetőség, vezetett zavar, 2 – 150 kHz frekvenciatartomány, sodronyok átviteli jellemzői, szimuláció, mérés

1. BEVEZETÉS

Ha jobban megnézzük a 2 – 150 kHz frekvenciatartomány elektromágneses összeférhetőséget biztosító szabványait, észrevehetjük, hogy még a vizsgálati módszerek rendelkezésre állnak mind a közös- [1], mind a differenciál módusú [2] zavarokra nézve, addig a megengedett zavarkibocsátási szintek hiányoznak. Ennél fogva az elektromágneses összeférhetőség jelenleg nem biztosított a kérdéses frekvenciatartományban [3].

Az elmúlt évtizedekben a teljesítményelektronika jelentős fejlődésen ment keresztül. Több olyan berendezés is került a hálózatra, amelyek a kérdéses frekvenciatartományban zavarkibocsátóként viselkednek [4]. Ilyenek például a megújuló energiaforrások inverterei, amelyek impulzuslélesség modulációval állítják elő a kívánt váltakozó feszültséget. Kapcsolási

frekvenciájuk néhány kHz-es nagyságú, amelynek felharmonikusai által keltett vezetett zavara a nem megfelelő szűrés hiányában a hálózatra is kijuthat.

Ezzel párhuzamosan a *smart grid* koncepció részeként növekvő igény mutatkozott okos eszközökre a villamos hálózaton is. Ilyenek például a távleolvasható fogyasztásmérők, amelyek a kisfeszültségű hálózatot használva villamoshálózati távközlés, PLC (*Power line communication*) segítségével továbbítják az adatokat a szolgáltató felé. A keskenysávú PLC technológia vivőfrekvenciái szintén a kérdéses frekvenciatartományba (néhányszor 10 kHz) esnek, a kommunikációs közeg pedig maga a villamos hálózat. Nemzetközi tapasztalatok azt mutatták, hogy az okos fogyasztásmérők – megfelelő EMC koordináció hiányában – érzékenyek az ebben a frekvenciatartományban jelentkező vezetett zavarokra. Ez egyrészt a sikertelen kommunikációban, másrészt az osztálypontosságot meghaladó mérési hibákban jelentkezik. A problémára megoldást csak a szabványosítási folyamat befejezése jelenthet, mely a számos megválaszolatlan kérdés miatt eddig nem készült el.

Az egyik fő kérdés a zavarterjedés-mechanizmusának jobb megismerése. Ez történhet pl. a zavarkibocsátók vizsgálatával. Az [5] irodalomban foglalkoznak bővebben egy naperőmű park szupraharmonikus emissziójának vizsgálatával. Másik lehetőség a csatolási út jobb vizsgálata, amely a kisfeszültségű hálózati elemek átviteli jellemzőit foglalja magában. Ilyenek pl. a közép/kisfeszültségű transzformátorok [6], vagy a sodronyok [7]. Cikkünk az utóbbi vizsgálatára fókuszál egy MATLAB alapú szimuláción keresztül.

A cikk felépítése a következő: a bevezető után a második fejezet ismerteti a felületi impedancia fogalmát, mely elengedhetetlen a korábbi mérési eredmények megértéséhez. A harmadik fejezet bemutatja a MATLAB szimuláció mögött lévő fizikai megfontolásokat, valamint a szimuláció egyes lépéseit. A negyedik fejezet a jelen cikkben ismertett szimuláció, valamint korábban végzett mérések eredményeit veti össze. Az utolsó fejezetben egy rövid kitekintést olvashatunk az eredmények további felhasználhatóságáról.

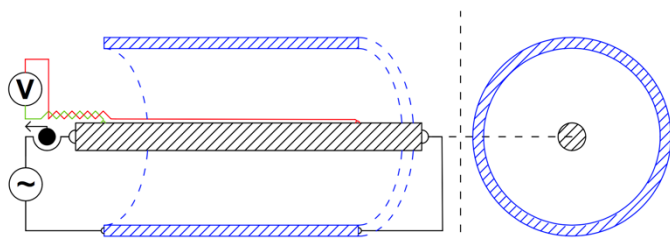
Megjegyzendő, hogy az elektromágneses összeférhetőségi probléma a 2 – 150 kHz tartományra korlátozódik, vizsgálatainkat azonban ennél nagyobb, 40 Hz – 150 kHz tartományban végeztük, hogy az értékek összehasonlíthatók legyenek a hálózati frekvencián mérhetőekkel.

2. FELÜLETI IMPEDANCIA

Ha azt mondjuk, „vezető impedanciája”, akkor ez alatt általában az adott vezető felületi impedanciáját értjük. A felületi impedancia általános definíciója a [8] irodalomban található, az ezzel kapcsolatos gyakorlati alkalmazások a [9] irodalomban 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 külső felületén 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 vezetőkön belüli feszültségesés, valamint az átfolyó áram hányadosaként van definiálva.

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



1. Ábra. Felületi impedancia mérési elrendezés vázlata

A felületi impedancia mérés megvalósítása a [7] irodalomban részletesen megtalálható. Itt csupán a definíciót közöltük annak érdekében, hogy a 4. fejezetben ismertetett összehasonlítás érthető legyen.

3. ELEMI VEZETŐS SZIMULÁCIÓ (FILAMENT TECHNIKA)

Egy vezető árameloszlásának meghatározása a keresztmetszet mentén jóval összetettebb matematikai feladat, mint azt elsőre gondolnánk. Ennek ismerete azonban elengedhetetlen bizonyos problémák megoldásához. A módszer kitalálását a teljesítményátviteli kábelek termikus szimulációja, valamint a kábelekben fellépő belső erők meghatározása hajtotta az 1970-es években, azonban alkalmazható a 2 – 150 kHz tartományban lévő zavarok terjedését meghatározó tényezők jobb megismerésére is, melyre a 2 – 150 kHz-es problémakör megjelenése előtt nem volt érdeklődés.

3.1 Vezető felbontása

Jelen fejezet célja annak bemutatása, milyen elvek mentén szükséges egy sodronyt felbontani elemi vezetőkre, nem célja azonban a módszer elméleti háttérének részletezése. Erről a [10] irodalomban lehet olvasni. A hivatkozott forrás függelék része továbbá egy egyszerű számítási példát is tartalmaz, melyen az egyes lépések jól követhetők.

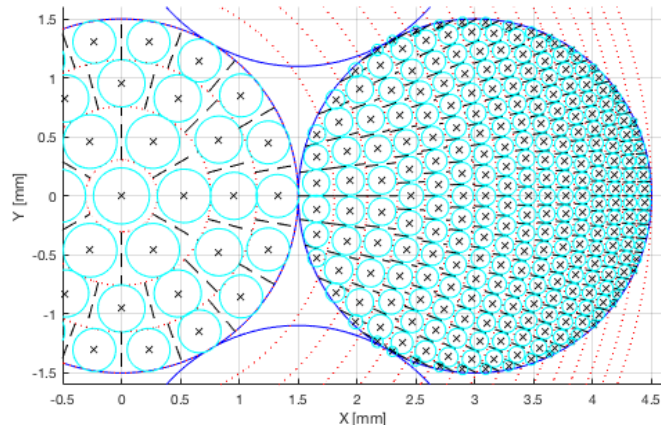
A módszer első lépéseként a sodronyt a keresztmetszete mentén fel kell bontani elemi vezetőkre, vagy más néven filamentekre. Minél részletesebb a felbontás, annál precízebb lesz az eredmény. Ezt a rendelkezésre álló számítási kapacitás azonban korlátozza. A felbontás

részletességének legalább olyanoknak kell lennie, hogy az elemi vezetők keresztmetszet mentén mérhető kiterjedése kisebb legyen, mint az adott frekvencián érvényes behatolási mélység:

$$\delta [mm] = 503.3 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (1)$$

Az (1) összefüggés használatával kiszámítottuk az adott frekvencián érvényes behatolási mélységet, majd megnéztük, mely mélységekben folyik a felületi áramsűrűség 96%, 92%, 88%, ..., 4%-a. A sodronyt ezen távolságok mentén legfeljebb 24 db koncentrikus körrel daraboltuk fel. Megjegyzendő, hogy kisebb frekvenciákon a sodrony középpontjában az áram nagyobb hányada folyik, mint a felületi áramsűrűség 4%, 8%, 12% stb. Ilyenkor kevesebb, mint 24 db koncentrikus kört hoztunk létre. Az így kapott, egymással koncentrikus körgyűrűket ezután sugár irányban daraboltuk tovább. Egy körgyűrűt annyi egyenlő darabra vágunk fel, mint a körgyűrű belső kerületének és vastagságának az aránya felfele kerekítve a legközelebbi hattal osztható egész számmra. Még az előbbi hányados a megközelítőleg trapéz alakú elemi vezetők létrehozását segítette elő, a hattal való oszthatóság a szimmetria megtartását garantálta.

A fenti lépéssorozatra az 2. ábrán példaként a 25 mm² keresztmetszetű sodrony felbontását láthatjuk 1080 Hz esetén. Maga a sodrony 7 vezetőlől áll: egy központi vezető és körülötte egy rétegben 6 vezető érintőlegesen. A vezetők azonos sugarúak.



2. Ábra. 25 mm² sodrony felbontása elemi vezetőkre (1080 Hz)

A 2. ábrán a sodrony középpontja az $x, y = 0$ koordinátáknál található. A sodronyt alkotó vezetők körvonalát sötétkék színnel ábrázoltuk. A felbontás első lépése a már említett koncentrikus körök létrehozása volt, melyek az ábrán piros színnel láthatók. Az így kapott körgyűrűk sugaraik mentén végzett felbontását fekete szaggatott vonalakkal jelöltük. Jól látható, hogy a felbontás során olyan elemi vezetők hoztunk létre, amelyeket körvonalak és sugarak határolnak. A felbontás utolsó feladata ezen elemi vezetők redukált sugarának

(GMR: *geometric mean radius*) meghatározása. Ezek láthatóan nem hengeres alakúak, így az egyszerű ismert formulák nem használhatók. Helyette a következő megoldást alkalmaztuk: az elemi vezetőket tovább bontottuk sok (elemi vezetőnként kb 4000 db) téglalpra, melyek GMR-je a (2) összefüggés szerint adódik [11].

$$GMR = 0,2235(x_0 + y_0) \quad (2)$$

, ahol x_0 és y_0 a téglalap oldalainak hossza. Egy adott elemi vezető redukált sugara az őt alkotó téglalapok redukált sugarainak eredőjével egyezik meg, melyre már létezik összefüggés. Ezt minden egyes elemi vezetőre elvégezve adódik a további számításokhoz szükséges bemenő adat.

3.2 Impedancia számítása

A 3.1. fejezetben ismertettük az általunk használt módszert, mellyel az eredeti sodronyt felbontottuk elemi vezetőkre. Most, hogy az egyes elemi vezetők középpontja és redukált sugara ismert, rátérhetünk a további számításokra. Ahogy azt korábban már említettük, feltételezzük, hogy az egyes elemi vezetőkben az árameloszlás egyenletes. Egy adott elemi vezetőn létrejövő feszültségesés (3) a rajta átfolyó árammal, valamint a többi elemi vezetőn folyó áram által indukált feszültséggel fog megegyezni.

$$U_i = I_i R_i + \sum_{k=1}^N I_k \cdot j\omega L_{ik} \quad (3)$$

, ahol U_i az i . vezetőn létrejövő feszültségesés, I_i az i . elemi vezetőben folyó áram, R_i az i . filament ellenállása, L_{ik} pedig az i . és k . vezető közti kölcsönös induktivitás, I_k a k . elemi vezetőben folyó áram. Az összes vezető egyszerűbb kezelhetősége érdekében (3)-at mátrixos alakban (4) használjuk.

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \vdots \\ \Delta U_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

A (4) összefüggés négyzetes mátrixának elemei a jól ismert Carson-Clem formulákkal számíthatók. Kapcsoljunk ezek után a vizsgált sodronyra egy virtuális U feszültséget. Ekkor minden elemi vezetőn U feszültségesés fog jelentkezni. Ennek oka, hogy az egyes elemi vezetők egy sodrony részei, így az ezeken jelentkező feszültségesés meg kell egyezzen az eredeti sodronyra kapcsolt feszültséggel. Ebből következik, hogy (4) mátrixot célszerű invertálni, hiszen a feszültség vektor az ismert, az áram ismeretlen.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \vdots \\ \Delta U_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

, ahol az előbbieket alapján:

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \dots = \Delta U_N = U \quad (6)$$

(6)-ot behelyettesítve (5)-be egy lényegesen egyszerűbb mátrixot kaphatunk (7).

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix} [\Delta U] \quad (7)$$

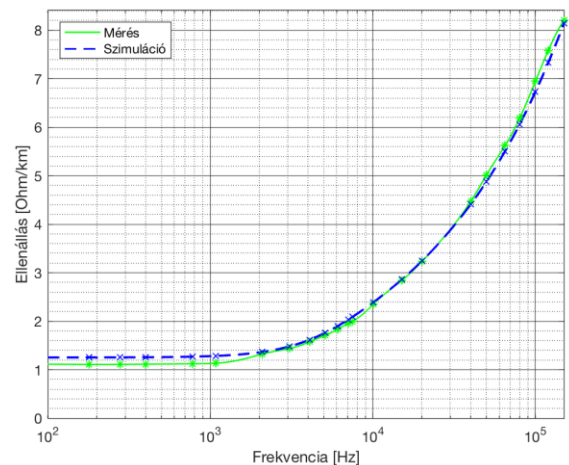
A (7) formula explicit tartalmazza az egyes elemi szálak impedanciáját, illetve a vizsgált sodrony eredő impedanciája is könnyen előállítható az összes elemi szál párhuzamos kapcsolásával.

4. EREDMÉNYEK

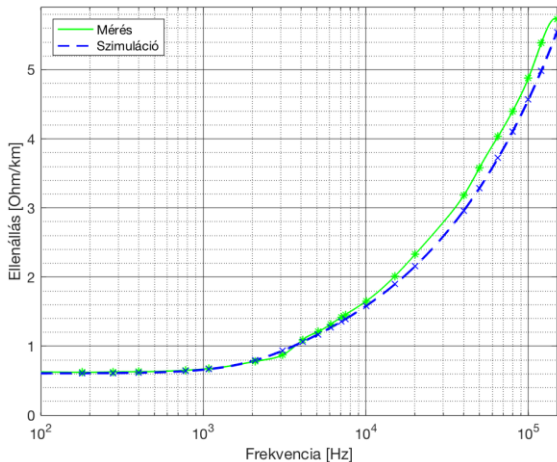
Jelen fejezet a sodronyokon (25 mm², 50 mm² és 95 mm² AAC) végzett mérés és szimuláció eredményeit ismerteti. A 25 mm², 50 mm² és 95 mm² keresztmetszetű sodronyok eredményei rendre a 3, 4, 5. ábrán tekinthetők meg.

Látható, hogy a szimuláció és a mérés eredményei jól egyeznek. A legnagyobb pontatlanság 10%, mely elsősorban soknak tűnhet, azonban két okból is megfelelőnek mondható: egyrészt a tipikus mérnöki alkalmazásoknál ennél jóval nagyobb bizonytalansági faktorok is vannak, amelyeket nem tudunk csökkenteni, csak megfelelően kezelni. Másrészt a 40 Hz – 150 kHz viszonylag nagy frekvenciatartománynak mondható, melyben precíz mérésekre csak igen drága eszközökkel lenne lehetőség.

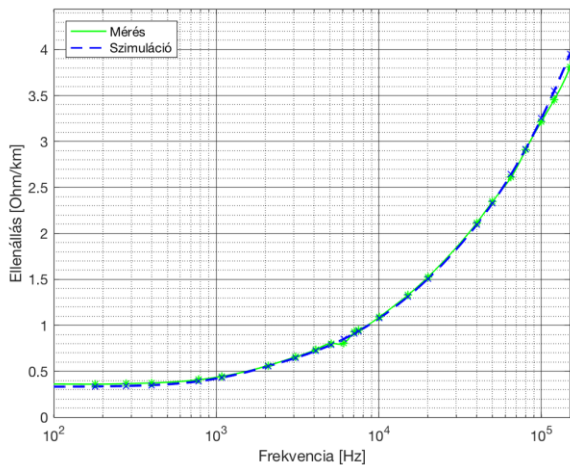
Természetesen felmerül a kérdés, hogy melyik alkalmazása preferált. Általánosságban a megfelelő felbontással végzett szimuláció tekinthető pontosnak, azonban ferromágneses anyagot is tartalmazó sodronyok esetén (pl. ACSR) a ferromágneses anyag nemlinearitása miatt iteráció számítás válna szükségessé, mely az így is lassú szimuláció lehetőségét elveti. Ilyenkor csak a frekvencia- és áramfüggő mérések célravezetőek.



3. Ábra. Mérés és szimuláció eredménye a 25 mm² sodrony esetén



4. Ábra. Mérés és szimuláció eredménye az 50 mm² sodrony esetén



5. Ábra. Mérés és szimuláció eredménye a 95 mm² sodrony esetén

5. ÖSSZEFOGLALÁS, KITEKINTÉS

Cikkünkben bemutattuk, hogyan lehet a kifesztésű hálózaton tipikusan használt sodronyok impedanciáját a 2 – 150 kHz frekvenciatartományban szimulációval meghatározni. Az így kapott R és L paramétereket kiegészítve a C és G értékekkel egy valós hálózati konfigurációban meghatározható a terjedési- és csillapítási együttható, amelyek a zavarterjedés fontos jellemzői.

6. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **IEC.**: 61000-4-16:2015: *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-16: Testing and measurement techniques – Test for immunity to conducted, common mode disturbances in the frequency range 0 Hz to 150 kHz*
- [2] **IEC.**: 61000-4-19:2014: *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-19: Testing and measurement techniques – Test for immunity to conducted, differential mode disturbances and signalling in the frequency range 0 Hz to 150 kHz at a.c. power ports*

- [3] **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
- [4] **CENELEC**: *CLC/SC205A Study Report on Electromagnetic interference between Electrical Equipment/Systems in the Frequency Range below 150 kHz*, Edition 3, October 2015
- [5] **Mohos A, Ladányi J.**: *Emission measurement of a solar park in the frequency range of 2 to 150 kHz*. IEEE International symposium and exhibition on electromagnetic compatibility (EMC Europe), 2018 (megjelenés alatt)
- [6] **S. Schöttke, S. Rademacher, J. Meyer, P. Schegner**: *Transfer Characteristics of a MV/LV transformer in the frequency range between 2 kHz and 150 kHz.*, International symposium on electromagnetic compatibility (EMC Europe), 2015
- [7] **Mohos A, Ladányi J.**: *Impedance characteristics of Aluminum Alloy Stranded Conductors in the frequency range 40 Hz to 150 kHz*. International symposium and exhibition on electromagnetic compatibility (EMC Europe), 2017
- [8] **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
- [9] **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
- [10] **Török B, Varjú Gy.** *Tetszőleges alakú vezetőrendszer impedanciájának meghatározása az elemi vezetők módszerével*. Elektrotechnika, 72. évf. 1. sz., 1979
- [11] **Geszi P. O.**: *Villamosenergia-rendszerek I.*, 1983