

# Vezeték nélküli töltőrendszer numerikus vizsgálata

Az induktív csatoláson alapuló vezeték nélküli energiaátvitel az elektromos eszközök között a legnépszerűbb rövidtávú töltési technika. Az induktív csatoláson alapuló módszer előnyeinek köszönhetően a jelenleg legalkalmasabbnak tűnő töltési technika az álló és a mozgó járművek esetében is. A cikkben egy járművek töltéséhez alkalmas töltőrendszert vizsgálok. A vezeték nélküli töltőrendszer leírásához a szimulációs modellnél a végeelem-módszerrel felépített modellhez szükség van a töltőelektronika figyelembe vételére is. A cikkben bemutatok egy szimulációs módszert ANSYS szoftverkörnyezetben a vezeték nélküli töltőrendszer szimulációjához.

Inductive coupling based wireless power transfer is a popular short-range power delivery mechanism for wide range of electric gadgets. The advances of this technology make it very desirable to the electric vehicle charging applications in both stationary and dynamic charging scenarios. In this work, the performance of a two-coil wireless power transfer system for vehicle applications is analysed. To describe the wireless power charger system, a simulation model is developed that combined an electrical circuit with a nonlinear finite element model. I introduce a simulation method for wireless power transfer system design with ANSYS software suite.

**Kulcsszavak:** Vezeték nélküli töltőrendszer, jármű töltése, végeelem-módszer, csatolt szimuláció

## 1. BEVEZETÉS

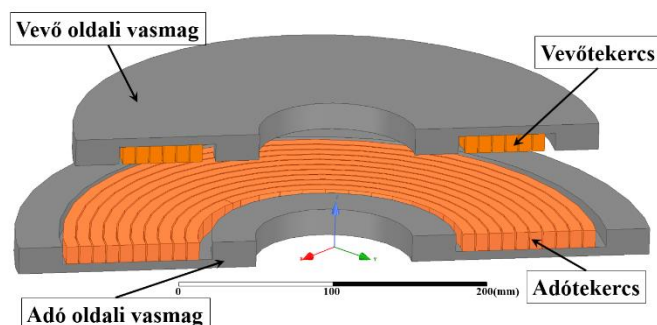
Az utóbbi évtizedben az ipar egyre növekvő érdeklődést mutat, hogy a különféle elektromos eszközöket vezeték nélküli csatlakozás nélkül töltsék. A vezeték nélküli energiaátvitel (Wireless Power Transfer – WPT) fejlesztésében a legnagyobb hajtóerőt az orvosi implantátumok, mobil eszközök (laptop, mobiltelefon) és az elektromos járművek jelentik.

Az energiaátvitel távolságának szempontjából kétféle töltési módszer létezik, a közelítéri és a távítéri [1]. A kis távolságú változat induktív vagy kapacitív rezonancián vagy induktív csatoláson alapul, a nagy távolság esetében pedig elektromágneses sugárzás, például mikrohullám segítségével történik a töltés [1]. Közúti járművek töltésénél a közelítéri módszerek jöhetnek szóba. Kis távolság esetében a kapacitív változat lehetőségeit erősen korlátozott az ezzel a módszerrel átvihető energia nagysága. Ehhez képest az induktív

csatoláson alapuló változattal már jelentős energia továbbítható. Ennek a módszernek a hatótávolságát a rezonancia és induktív csatolás együttes használatával lehet kiterjeszteni [2, 3, 4].

A vezeték nélküli töltés a közúti járműveknél lehetőséget biztosít arra, hogy a parkolóban, míg áll a jármű töltsük azt, vagy egy raktárban, telephelyen a szállítóeszközök folyamatosan üzemeljenek, ha a padlóban vezeték nélküli töltősávok vannak beépítve. De jelentős kutatások folynak az autópályán, autópályán egy-egy töltősáv létrehozásával kapcsolatban, ahol menet közben lehet a járművet tölteni, ezzel megoldva az elektromos járművek egy fő problémáját, a hatótávolságot.

A következőkben bemutatok egy töltőnek a végeelem-módszerrel (Finite Element Method - FEM) [5, 6] történő szimulációját, azon belül is a csatolási tényező változását a távolság és az átfedés függvényében. Majd ezt követően a vezeték nélküli töltőrendszer frekvencia- és időtartománybeli vizsgálatát ismertetem. A vezeték nélküli töltő egyik fő részét, melyet a szimulációk során a végeelem-módszerrel írtam le, az adó- és vevőtekerceset és a hozzájuk tartozó vasmagot az 1. Ábra mutatja.



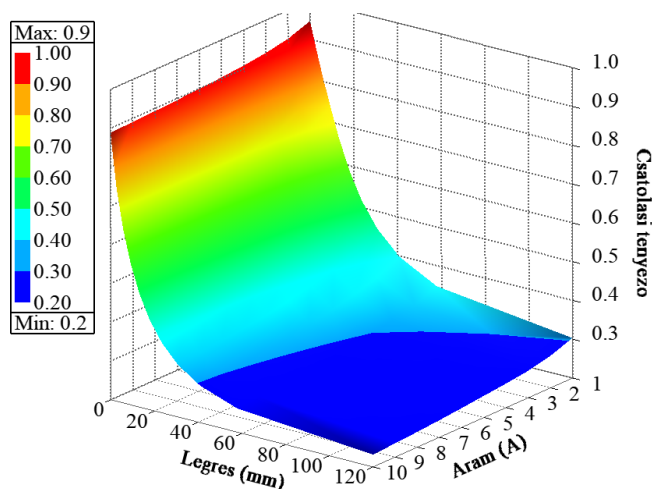
1. Ábra. A cikkben vizsgált vezeték nélküli töltő adó és vevő oldalának felépítése.

## 2. Nagylégrésű transzformátor vizsgálata

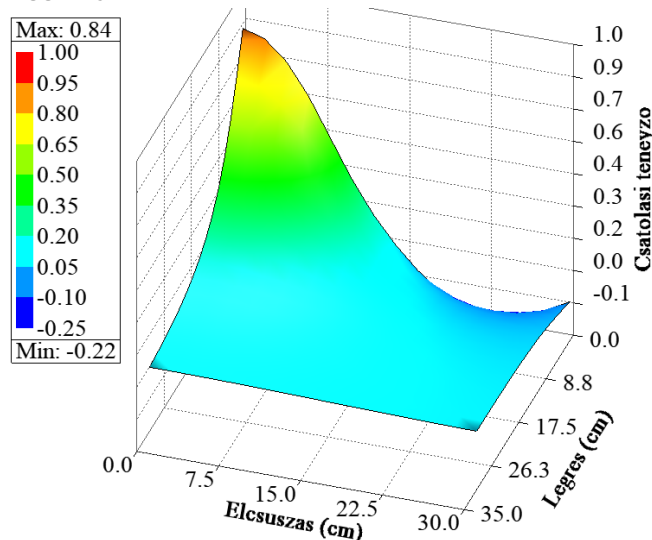
Az 1. Ábrán látható elrendezés egy nagylégrésű transzformátornak tekinthető [1]. Azonban amíg egy hagyományos transzformátornál viszonylag könnyen meghatározható a kölcsönös induktivitás analitikus úton, a szórt fluxus normál üzemben elhanyagolható. Ezzel szemben a nagylégrésű transzformátorra ez nem igaz. Itt a szórt fluxus jelentős és analitikus úton csak néhány egyszerű vagy nagyon speciális alakzat esetében ismert a kölcsönös induktivitás összefüggése, tetszőleges alakzatra nem [2]. Ilyen esetekben jól alkalmazható az elektromágneses térszámítás, azon belül is a végeelem-módszer [5, 6].

A töltő adó oldali tekercse 10 menetből, vevő oldali tekercse pedig 6 menetből áll. A menetek Litz vezetékek, melyek 384 0,25mm-es párhuzamos szálból állnak. A vasmag anyaga FDK 6H40 ferrit.

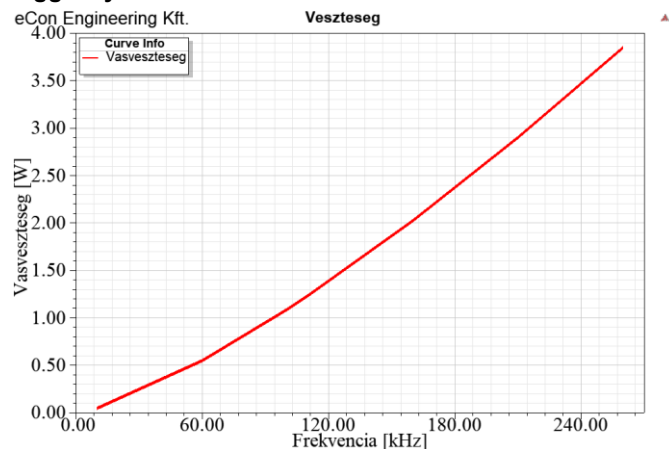
Az energiaátvitel szempontjából az egyik legfontosabb paraméter a két tekercs közötti csatolási



2. Ábra. A csatolási tényező az áram és a tekercstávolság függvényében.



3. Ábra. A csatolási tényező a tekercstávolság és a tekercsek egymáshoz képesti elcsúszásának függvényében.



4. Ábra. A vasvesztesség változása a frekvencia függvényében.

tényező. Ezért fontos volt vizsgálni, hogy a csatolási tényező milyen módon változik az áram, a két tekercs

távolságának és az egymáshoz képesti vízszintes elcsúszás függvényében. Ennek a vizsgálatnak az eredményeit a 2. és a 3. Ábra mutatja. Az ábrákon jól látható, hogy a csatolási tényező jelentősen változik a távolság és a két tekercs egymáshoz képesti elhelyezkedésének függvényében. A tekercsek közötti légrésnél mindkét oldalon 5-5 mm burkolatot feltételeztem, tehát az 1 mm légrés ténylegesen 11 mm-t jelent a két tekercs között.

A szimulációk során vizsgáltam a veszteségeket is. A tekercs vesztesége a rajta átfolyó áramtól függ, mivel a Litz vezetéknek köszönhetően az örvényáramok okozta közelhatás és áramkiszorítás nem jelentős. Így a legfontosabb a vasmagban létrejövő veszteség vizsgálata volt. A 4. Ábrán látható a veszteség a frekvencia függvényében, 40 mm-es légrést feltételezve. Az ábra jól mutatja, hogy a frekvencia növekedésével a veszteség is nő. A járművek töltési ideje több órát vesz igénybe, ezért célszerű 100 kHz alattira beállítani a működési frekvenciát a túlmelegedésből származó meghibásodás, tönkremenetel elkerülése végett.

A következőkben a teljes töltőrendszer vizsgálatát és az azzal kapott eredményeket mutatom be. A töltőrendszerrel a légrést 40 mm-nek választottam és azt feltételeztem, hogy vízszintesen a két tekercs pontosan egybeesik.

### 3. A vezeték nélküli töltőrendszer frekvenciatartománybeli vizsgálata

Az induktív csatoláson és a rezonancián alapuló vezeték nélküli töltőrendszer vizsgálata két fő részből áll. Először az adó- és a vevőoldali rezonanciafrekvenciát kell meghatározni, majd ezt követi a teljes rendszer időtartománybeli vizsgálata.

A rezonanciafrekvenciához felépített modell az 5. Ábrán látható. A rendszer az ANSYS Simplorer [9] rendszerszimulátorban lett felépítve, ahol az adó és vevő oldali tekercs ellenállásváltozása, ön- és kölcsönös induktivitása az ANSYS Maxwell-ben [9] a végelelem-módszerrel felépített modellből származik. Az  $R_p$  és  $R_s$  a tekercsek egyenáramon mért ellenállását jelölik, ami  $7,2\text{m}\Omega$  és  $3,6\text{m}\Omega$ . A  $C_p$  és  $C_s$  kapacitások értékét a szimuláció során a következő összefüggésekkel határoztam meg [2]

$$C_p = \frac{1}{\omega_0^2 L_s}; \quad C_s = \frac{1}{\omega_0^2 (1-k^2) L_p} \quad (1)$$

ahol,

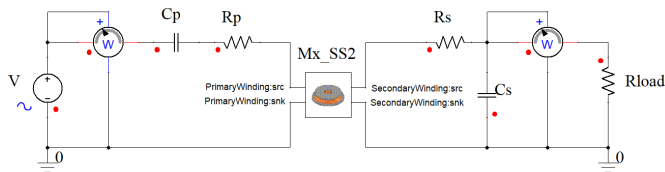
$\omega_0$  a körfrekvencia;

$L_p, L_s$  az adó- és a vevőoldali tekercs induktivitása;

$k$  a csatolási tényező.

A p alsó index az adó, az s alsó index a vevő oldalt jelöli. Az  $R_{load} = 10\Omega$  pedig egy a szimulációhoz tetszőlegesen választott érték, amelynél a tekercs ellenállásától való legalább két nagyságrendbeli eltérés volt a feltétel.

A szimulációval kapott eredmény a 6. Ábrán látható. Az ábra az adó oldal áramának és vevő oldal



4. Ábra. A rezonanciafrekvencia meghatározásához használt áramkör a tekercsek FEM modelljével.

feszültségének amplitúdó és fázis karakterisztikáját mutatja. A „Transmitter” az adó oldal eredményeit, a „Receiver” a vevő oldal eredményeit jelöli az ábrán. A rezonanciafrekvencián az adóoldalon a soros rezgőkör miatt az áramnak, a vevőoldalon a párhuzamos rezgőkör miatt a feszültségnek kell maximálisnak lennie [8, 9]. A frekvenciatartományban végzett szimulációval kapott amplitúdó-diagramból jól látható a feszültség és áram maximum, ahol a rezonancia van. A rezonanciafrekvencia 67,31 kHz. A veszteségek szempontjából is teljesen jó a kapott frekvenciaérték. A fázisdiagramban látható fázistolás az induktív csatolás miatt van a rendszerben.

#### 4. A töltőrendszer időtartománybeli vizsgálata

A rezonanciafrekvencia ismeretében a teljes töltőrendszer vizsgálhatóvá válik. Az inverter vezérléséhez van szükség a rezonanciafrekvenciára. A teljes töltőrendszer modelljének felépítése a 6. Ábrán látható.

A teljes rendszer adó oldalán található az 50 Hz-es háromfázisú megtáplálás, 400 V vonali feszültséggel, egy háromfázisú diódás egyenirányító és egy egyfázisú teljesítmény inverter a rezonanciafrekvencián történő gerjesztéshez. Középen a nagylégrésű transzformátor végelem-módszerrel felépített modellje található. A vevő oldalon terhelésként az elektromos jármű akkumulátora található, amit a vevő oldallal, mint a töltő része, egy kétfázisú diódás egyenirányító köt össze.

A vezeték nélküli töltő gerjesztőjele egy impulzusszélesség modulált feszültséggel („Transmitter”), ahogy az a 7. Ábrán látható. Az inverter kapcsolási frekvenciája a rezonanciafrekvencia. A 7. Ábra továbbá még a vevőoldal („Receiver”) és az akkumulátor („Battery”) áramának és feszültségének időfüggvényét mutatja. Az akkumulátornál kapott áram és feszültség időfüggvény azt mutatja, hogy működik a töltőrendszer, az akkumulátor töltődik.

Azonban az adó és vevő oldal teljesítményét vizsgálva a töltő hatásfoka 46%. Ennek egyik oka, a két oldal közötti légrés, vagyis a tekercsek közötti csatolás, illetve az egyen-, váltóirányítóban valamint a töltőben keletkező veszteségek.

#### 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatásra került egy elektromos járművek töltéséhez tervezett vezeték nélküli töltőrendszer végelem-módszerrel történő szimulációja és a teljes töltő rendszerszintű vizsgálata. A vizsgált töltő az adó és vevő oldali tekercsek induktív csatolása mellett

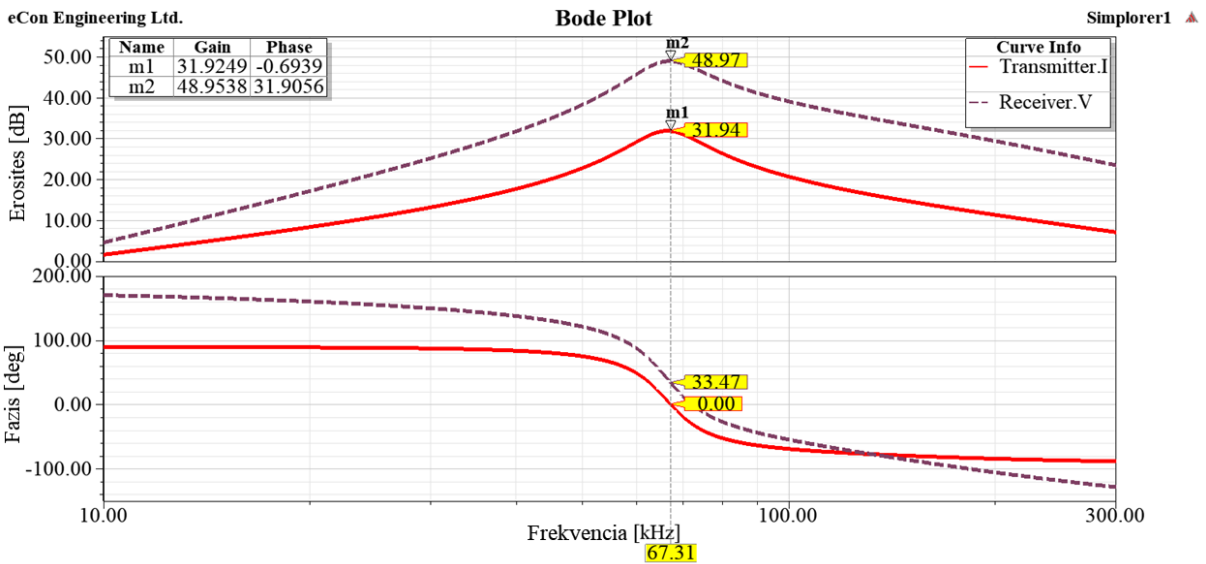
kihasználja a rezonanciát is a távolság növeléséhez, ezért nem elég önmagában a végelem-módszer a vizsgálathoz. A rendszerszintű szimuláció során a töltőt, mint nagylégrésű transzformátort a numerikus modelljével írtam le.

A vezeték nélküli töltő vizsgálatát követően meghatároztam a rezonanciafrekvenciát, majd ezt felhasználva vizsgáltam a teljes töltőrendszer működését egy adott üzemállapotban. Az időtartománybeli vizsgálattal kapott eredmények alapján kijelenthető, hogy működik a rendszer, tehát alkalmas elektromos járművek töltésére. Azonban a rendszer hatásfokát tekintve a rendszer további fejlesztésekre szorul, mert a nem töltésre használt energia hővé alakul, így szinte biztosan melegezési problémák lépnének fel a kész eszköznél a működés során.

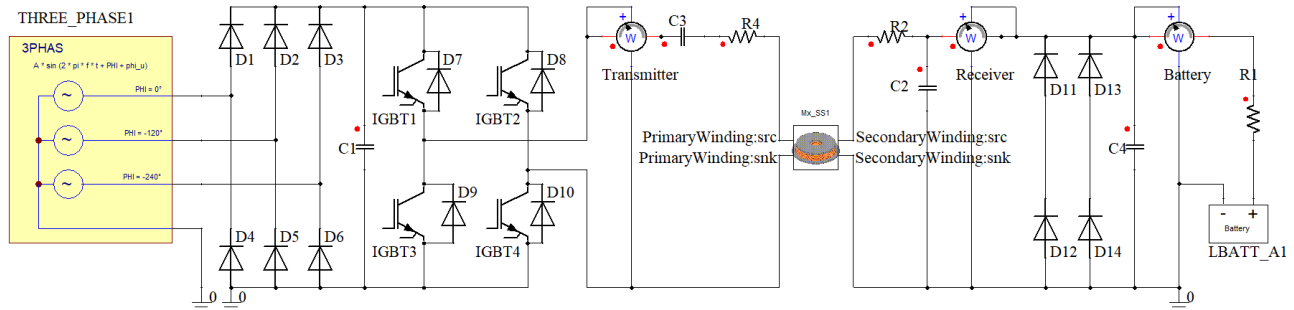
Jövőbeli tervem a töltő geometriájának optimalizálása a vasmag térfogatának csökkentése és a csatolási tényező maximalizálása érdekében. Emellett fontosnak tartom a jövőben vizsgálni a tekercsek mechanikai deformációját és annak hatását a csatolási tényezőre. Valamint a veszteségekből származó melegezést figyelembe venni a szimulációban, ami jelentősen befolyásolja a tekercsek vezetőképességét, vagyis a teljes rendszer működését. Végül a kHz-es kapcsolási frekvencia és nagy szórt mágneses fluxus miatt az elektromágneses kompatibilitás szempontjából is vizsgálni kell a rendszert.

#### 6. IRODALOMJEGYZÉK

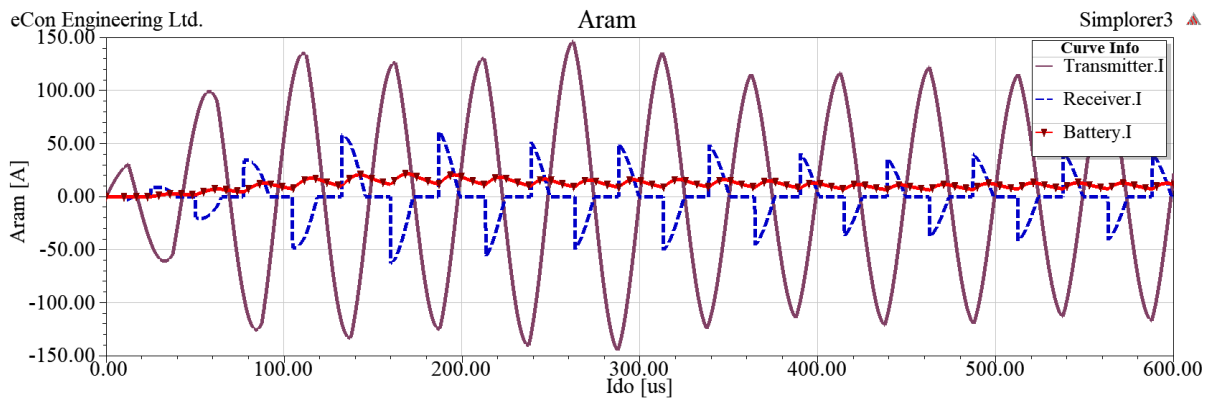
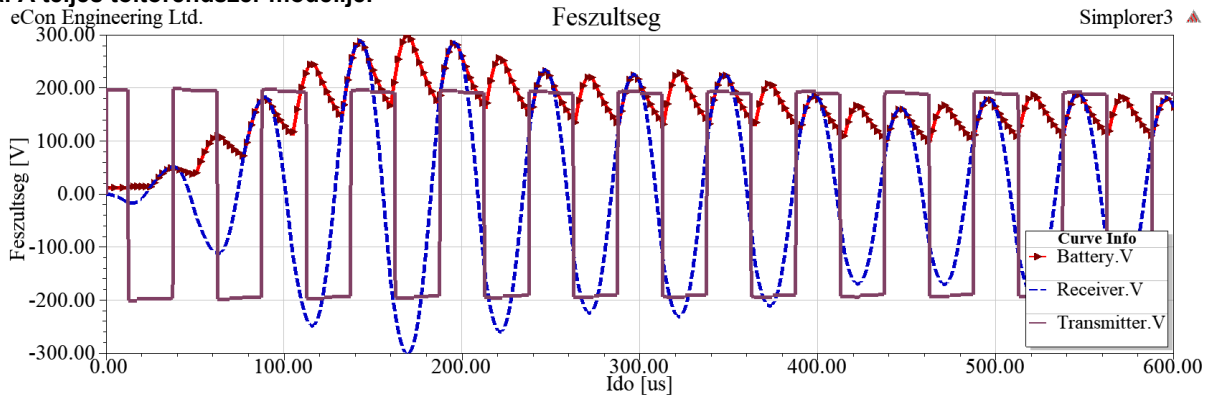
- [1] **Kim, K.Y.:** *Wireless Power Transfer – Principles and Engineering Explorations*, InTechOpen, London, 2012.
- [2] **Reuben, L., Leo, W., Charles, E.C.:** *Electronic Transformers and Circuits*. Wiley-Interscience, New York, 1988.
- [3] **Rikard, V.:** *Wireless Energy Transfer by Resonant Inductive Coupling*. Diplomamunka, Dept. of Signals and Systems, Chalmers University of Technology, 2015.
- [4] **Jay, R., Palermo, S.:** *Resonant Coupling Analysis for a Two-Coil Wireless Power Transfer System*. 2014 IEEE Dallas Circuits and Systems Conference, Pp. 1-4, Richardson, TX, 12-13 Oct. 2014.
- [5] **Kuczmann, M., Iványi, A.:** *The Finite Element Method in Magnetics*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2008.
- [6] **Silvester, P.P., Ferrari, R.L.:** *Finite Elements for Electrical Engineers*, University Press, Cambridge, 1996.
- [7] *ANSYS Release 19.0 Documentation (2018)*
- [8] **Mehdi, K., Maysam, G.:** *The Circuit Theory Behind Coupled-Mode Magnetic Resonance-Based Wireless Power Transmission*. IEEE Transactions on Circuit and System – I. Regular Paper, Vol. 59, Pp.2065-2074, 2012.
- [9] **Lee, C.H., Jung, G., Shin, S., Kim, Y., Song, B., Shin, J., Chung, S.H., Kim, D.O., Lee, J.:** *Design and introduction of high power transfer system for electrical vehicles*. 2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation Proceedings, Pp 280-284, Beijing, 30. Aug. – 1. Sept. 2013.



5. Ábra. A frekvenciatartománybeli vizsgálattal kapott Bode-diagram.



6. Ábra. A teljes töltőrendszer modellje.



7. Ábra. Az időtartománybeli vizsgálattal kapott feszültség és áram időfüggvények.