

Sistem za avtomatsko meritev sklopljenosti navitij za potrebe načrtovanja sistemov za brezžični prenos energije

Jure Domajnko¹, Rok Friš¹, Nataša Prosen¹, Mitja Truntič¹

¹UM FERl

E-pošta: jure.domajnko2@um.si

An automatic coupling coefficient measurement platform for wireless power transfer design

This conference paper presents the automated system for the coupling coefficient measurement between the transmitter and the receiver coil in wireless power transfer (WPT) systems. The platform consists of the computer controlled 3D positioning mechanism and the coupling coefficient measurement system. The platform can be used to design the wireless transmitter and the receiver coil. The practical measurements can serve as a replacement for time consuming simulations using electromagnetic simulation software. The measurement platform was tested with two different coil types.

1 Uvod

Z razvojem področja baterijsko napajanih naprav so se pojavile tudi težnje po brezžičnem polnjenju. Najbolj pogosto se brezžično polnjenje uporablja za polnjenje telefonov, brezžičnih slušalk in pametnih ur. Veliko raziskav poteka tudi na področju brezžičnega polnjenja električnih vozil [1, 2] in na področju polnjenja medicinskih vsadkov [3].

V primerjavi s polnjenjem preko kabla, je sistem za brezžično polnjenje bolj kompleksen in težji za načrtovanje. Ker se energija prenaša preko zračne reže, je teoretični izkoristek sistema za brezžični prenos energije že sam po sebi manjši. Na izkoristek ima velik vpliv koeficient sklopljenosti med oddajnim in sprejemnim navitjem. Ta je odvisen od samega tipa oblike navitij in geometrijskih lastnosti [4]. Koeficient sklopljenosti je odvisen tudi od razdalje in poravnosti med oddajnim in sprejemnim navitjem. Razdalja med navitji, ki je odvisna od aplikacije, se navadno ne spreminja. Po drugi strani se poravnost med oddajnim in sprejemnim navitjem lahko spreminja, sploh v primeru, če pozicioniranje naprave ni avtomatsko.

Zaradi tega raziskave na področju brezžičnega prenosa energije pogosto potekajo v smeri izboljšave izkoristka sistema v primeru poravnosti med oddajnim in sprejemnim navitjem. Toleranca na neporavnost se v največji meri izboljša z optimizacijo in z uporabo na neporavnost bolj tolerantnih oddajnih in sprejemnih navitij. Pri optimizaciji si pogosto pomagamo s pomočjo programov za simulacijo elektromagnetnega polja, kot sta An-

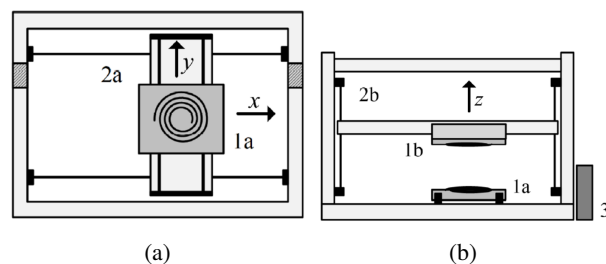
sys Maxwell in CMSOL ter s praktičnimi eksperimenti. Pri eksperimentih lahko medsebojno induktivnost izmerimo samo ročno, v diskretnih točkah.

V članku bomo predstavili sistem za eksperimentalno meritev, ki lahko popolnoma avtomatizirano izmeri koeficient sklopljenosti med oddajnim in sprejemnim navitjem. Merilni sistem je bil izdelan modularen, nemanjen za meritve z različnimi oblikami oddajnih in sprejemnih navitij. Članek ima sledečo strukturo. Za uvodom je predstavljen 3D mehanizem, ki omogoča pozicioniranje oddajnega in sprejemnega navitja. V nadaljevanju je opisana metoda meritve medsebojne induktivnosti in koeficienta sklopljenosti. V četrtem poglavju je predstavljeno vezje merilnika. Rezultati meritev so predstavljeni v petem poglavju na primeru dveh navitij različnih tipov.

2 Sistem za pozicioniranje navitij v 3D prostoru

Osnova sistema, ki omogoča avtomatizacijo meritev je mehanizem za pozicioniranje v 3D prostoru. Poravnost med oddajnim in sprejemnim navitjem je določena v x - y ravnini in razdalja med navitji je določena v z ravnini. Pozicija oddajnega in sprejemnega navitja je določena s pomočjo računalniške aplikacije, ki se uporablja za interakcijo med uporabnikom in merilnim sistemom.

Mehanizem za pozicioniranje navitij v prostoru je prikazan na sliki 1. Slika 1a prikazuje mehanizem v x - y ravnini. Glavni del mehanizma predstavlja premična ploščad, označena z oznako (1a), ki omogoča pozicioniranje oddajnega navitja navitja v y osi. Ploščad se nahaja na dodatnih vodilih, označenih z (2a), ki omogočajo premik v x osi. Tako se lahko oddajno navitje premika v



Slika 1: Mehanizem za pozicioniranje navitij v prostoru: (a) x - y ravnina, (b) x - z ravnina

x - y ravnini. Slika 1b prikazuje mehanizem v x - z ravnini. Zgornja ploščad, na katero je nameščeno sprejemno navitje je označeno z (1b). Vodila (2b) omogočajo, da se ploščad (2a) premika v z osi.

V x - y osi se spodnja ploščad mehanizma premika s pomočjo zobatih jermenov in koračnih motorjev, v z smeri pa s pomočjo koračnega motorja in navojne letve. Krmilnik za koračne motorje in komunikacijo z računalnikom je na sliki 1b označen z (3). Poleg motorjev je mehanizem opremljen še s stikali, na podlagi katerih se določi začetna pozicija mehanizma.

Računalnik in mehanizem komunicirata preko USB vodila v obliki G kode, ki se uporablja tudi za krmiljenje CNC naprav.

3 Merilnik medsebojne induktivnosti

V praksi se metode za meritev medsebojne induktivnosti delijo na *on-line* metode in *off-line* metode. *On-line* metode merjenja omogočajo meritev koeficienta sklopljenosti med tem, ko sistem prenaša energijo, medtem ko se *off-line* metoda uporablja, ko sistem ne prenaša energije.

On-line metode za določitev koeficienta sklopljenosti uporabijo meritev impedance resonatorja [5, 6], pri eni ali pri več frekvencah [7]. Impedanca se lahko določi tudi s pomočjo Fourierove transformacije.

V našem primeru uporabimo *off-line* metodo meritve. Prednost *off-line* metode je, da se lahko uporablja za načrtovanje samih navitij, pri čemer ne potrebujemo celotnega sistema za brezžični prenos energije, ki bi navitji vzbujal in prenašal energijo. Tako se lahko navitja načrtajo ločeno od sistema, sam sistem pa se nato prilagodi na navitji. V našem primeru medsebojno induktivnost in koeficient sklopljenosti izmerimo s pomočjo meritve induktivnosti navitij.

3.1 Meritev koeficienta sklopljenosti s pomočjo merilnika induktivnosti

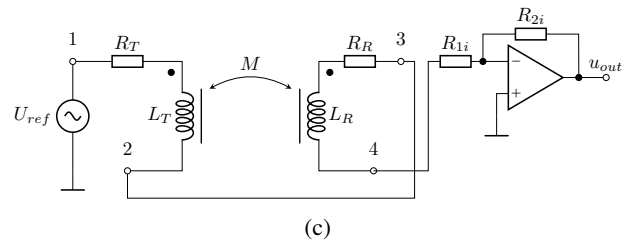
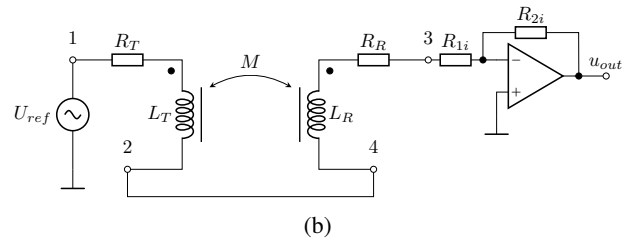
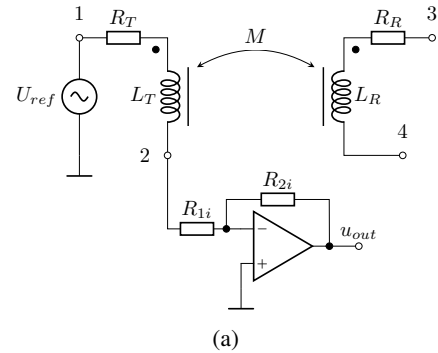
Medsebojno induktivnost med dvema navitjema lahko izračunamo na različne načine. Eden izmed načinov, ki smo ga uporabili tudi v našem primeru je meritev medsebojne induktivnosti preko zaporedne vezave dveh navitij [8]. Medsebojna induktivnost med dvema navitjema je lahko pozitivna ali negativna. V primeru pozitivne medsebojne induktivnosti lahko koeficient sklopljenosti izračunamo s pomočjo enačbe (1).

$$L_{X1} = L_T + L_R + 2M \quad (1)$$

pri čemer je L_{X1} zaporedna induktivnost oddajnega in sprejemnega navitja v primeru pozitivne medsebojne induktivnosti, L_T je lastna induktivnost oddajnega navitja, L_R je lastna induktivnost sprejemnega navitja in M je medsebojna induktivnost med oddajnim in sprejemnim navitjem, ki se izračuna po enačbi 2.

$$M = k\sqrt{L_T L_R} \quad (2)$$

pri čemer je k koeficient sklopljenosti med oddajnim in sprejemnim navitjem.



Slika 2: Vezeve za meritev medsebojne induktivnosti med oddajnim in sprejemnim navitjem: (a) Meritev lastne induktivnosti navitja, (b) Meritev pozitivne medsebojne induktivnosti L_{X1} med oddajnim in sprejemnim navitjem, (c) Meritev negativne medsebojne induktivnosti L_{X2} med oddajnim in sprejemnim navitjem.

V primeru negativne medsebojne induktivnosti, izmerjeno zaporedno induktivnost označimo z L_{X2} in jo izračunamo s pomočjo enačbe (3).

$$L_{X1} = L_T + L_R - 2M \quad (3)$$

Za izračun medsebojne induktivnosti, lahko enačbi (1) in (3) združimo v enačbo (4), pri kateri ne potrebujemo lastnih induktivnosti oddajnega in sprejemnega navitja.

$$M = \frac{L_{X1} - L_{X2}}{4} \quad (4)$$

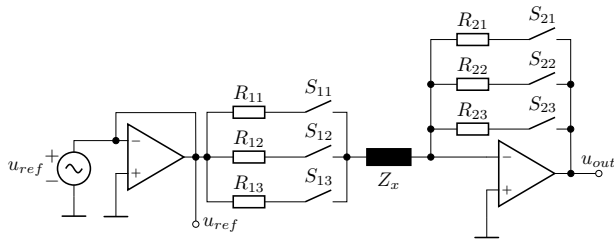
Iz medsebojne induktivnosti lahko izračunamo koeficient sklopljenosti po enačbi (5). Medsebojno induktivnost med oddajnim in sprejemnim navitjem lahko izračunamo v več točkah v prostoru.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_T L_R}} \quad (5)$$

Na podlagi meritev se lahko izriše karakteristika posameznega para navitij. Karakteristika se lahko uporablja pri načrtovanju sistemov za brezžični prenos energije.

3.2 Merilnik induktivnosti na osnovi samodejno uravnoteženega merilnega mostiča

Eden izmed načinov meritve induktivnosti je metoda s samodejno uravnoteženim mostičem [9]. Metoda bazira na



Slika 3: Struktura samodejno uravnoteženega mostiča z neznano impedanco Z_x

osnovi invertirajočega operacijskega ojačevalnika. Vezje merilnika je prikazano na sliki 3. Induktivnost, ki jo merimo je predstavljena z neznano impedanco Z_x . Natančneje, impedanco Z_x opišemo z enačbo (6).

$$Z_x = R_x + j\omega_{ref} L_x \quad (6)$$

pri čemer je R_x upornost žice in L_x induktivnost priključene neznane induktivnosti.

Vhod v vezje predstavlja referenčna sinusna napetost u_{ref} z amplitudo \hat{U}_{ref} in izhod iz vezja predstavlja sinusna napetost u_{out} z amplitudo \hat{U}_{out} . Frekvenca, pri kateri je izmerjena induktivnost je tako odvisna od frekvence referenčne sinusne napetosti.

Merilnik omogoča tri različne stopnje občutljivosti, ki jih lahko nastavimo s pomočjo stikal S_{11} , S_{12} in S_{13} ter stikal S_{21} , S_{22} in S_{23} , z vključevanjem merilnih uporov. Pri manjših upornostih je merilnik bolj občutljiv. Tako se lahko merilnik uporablja za merjenje koeficienta sklopljenosti širokega razpona navitij.

Za izračun neznane impedance Z_x je potrebno izmeriti amplitudo vhodnega referenčnega signala U_{ref} in amplitudo izhodne napetosti U_{out} . Neznano induktivnost lahko izračunamo po enačbi 7.

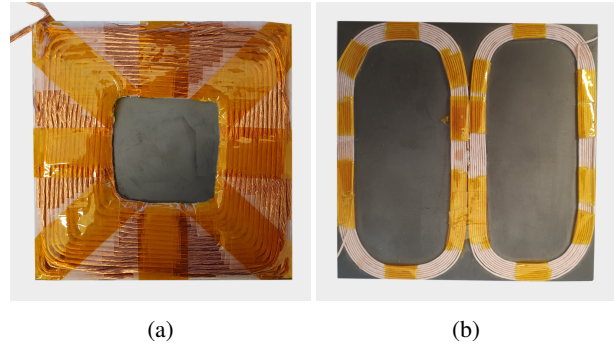
$$L_x = \frac{R_{2i}}{2\pi f_{ref}} \frac{\hat{U}_{out}}{\hat{U}_{ref}} \sin(\Phi) \quad (7)$$

pri čemer je L_x neznana induktivnost, \hat{U}_{ref} amplituda vhodne referenčne napetosti, \hat{U}_{out} amplituda izhodne napetosti, Φ fazni kot med vhodno in izhodno napetostjo in f_{ref} je frekvenca sinusne referenčne napetosti. Dodatno lahko občutljivost nastavljam s pomočjo upornosti R_{1i} , ki je vezana zaporedno z neznano impedanco in upornosti R_{2i} , ki je v negativni povratni veji operacijskega ojačevalnika.

Neznano upornost žice lahko izračunamo s pomočjo enačbe (8).

$$R_x = \frac{R_{2i}}{\frac{\hat{U}_{out}}{\hat{U}_{ref}}} \cos(\Phi) - R_{1i} \quad (8)$$

Za meritev medsebojne induktivnosti in koeficienta sklopljenosti je pomembna samo meritev neznane induktivnosti. Meritev upornosti žice pri tem nima vpliva. Upornost žice vpliva samo na toplotne izgube sistema za brezžični prenos energije.



Slika 4: Oblika navitij: (a) klasično spiralno ploščato navitje, (b) DD navitje

4 Rezultati meritve

Rezultate meritve koeficienta sklopljenosti lahko razdelimo na dva dela. V prvem delu smo izmerili koeficient sklopljenosti, ko se je spreminjala z razdalja med oddajnim in sprejemnim navitjem. Ta test pride v poštev, ko želimo določiti kolikšna naj bo razdalja med oddajnim in sprejemnim navitjem v končni aplikaciji. Drugi del predstavlja meritev tolerance na neporavnost v x - y ravnini pri določeni z razdalji.

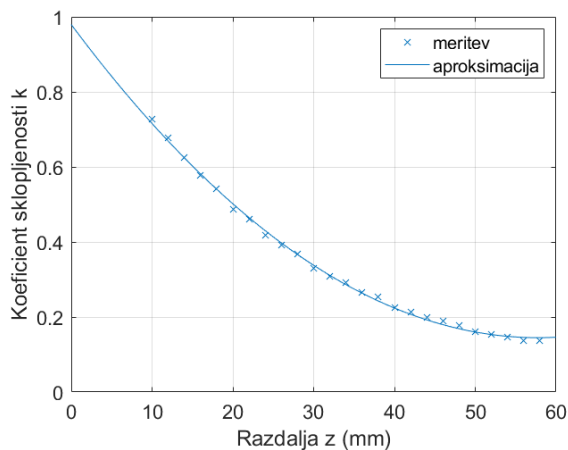
Meritve smo izvajali na dveh različnih tipih oddajnega in sprejemnega navitja, ki sta prikazani na sliki 4. Slika 4a prikazuje klasično spiralno navitje v obliki kvadrata. Takšni tip navitja je najbolj pogost. Ker nima usmerjenega magnetnega polja ima slabo, a simetrično toleranco na neporavnost. Slika 4b prikazuje posebno DD obliko navitja. Gre za navitje z usmerjenim magnetnim pretokom, prvič opisano [10]. Sestavljeno je iz dveh zaporedno vezanih spiralnih navitij D oblike. Prednost DD navitja je boljše toleranco na neporavnost v smeri, ki je pravokotna na smer usmerjenega magnetnega pretoka. S sistemom za avtomatizirano meritev koeficienta sklopljenosti smo izmerili vpliv pozicij oddajnega in sprejemnega navitja v prostoru na koeficient sklopljenosti in s tem posledično tudi na izkoristek sistema.

Meritve koeficienta sklopljenosti izvajamo med dvema navitjema iste oblike. Obe obliki navitij imata enako ploščino, in sicer sta velikosti 100×100 mm, ki je določena z dimenzijami uporabljenega feritnega materiala.

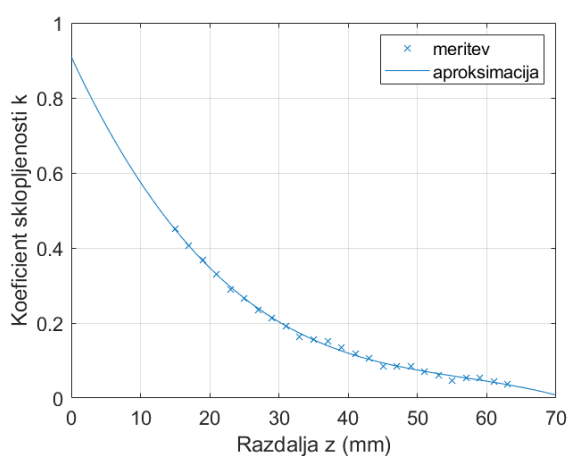
4.1 Meritev koeficienta sklopljenosti v z osi

Meritev koeficienta sklopljenosti navitij v z osi je prikazana na sliki 5. Slika 5a prikazuje meritev koeficienta za klasični spiralni ploščati navitji in slika 5b prikazuje meritev koeficienta za DD navitji. V obeh primerih so točke, ki so bile izmerjene označene s križci, polna črta pa predstavlja aproksimacijo.

V obeh primerih koeficient sklopljenosti upada z razdaljo med navitji. Klasično spiralno ploščato navitje ima nekoliko večji koeficient sklopljenosti, predvsem zaradi tega, ker ima posamezno navitje večji premer. To pomeni, da lahko klasično spiralno ploščato navitje prenaša energijo na daljše razdalje kot DD navitje s podobnimi zunanji dimenzijami. V praktičnih aplikacijah, pri katerih je raz-



(a)



(b)

Slika 5: Vpliv razdalje med navitji z na koeficient sklopljenosti: (a) klasično spiralno ploščato navitje, (b) DD navitje

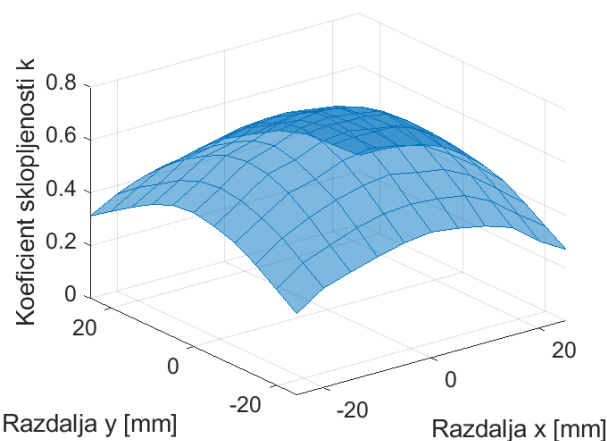
dalja z med navitji fiksna, velikost navitij glede na to prilagodimo.

4.2 Meritev koeficienta sklopljenosti v x - y ravnini

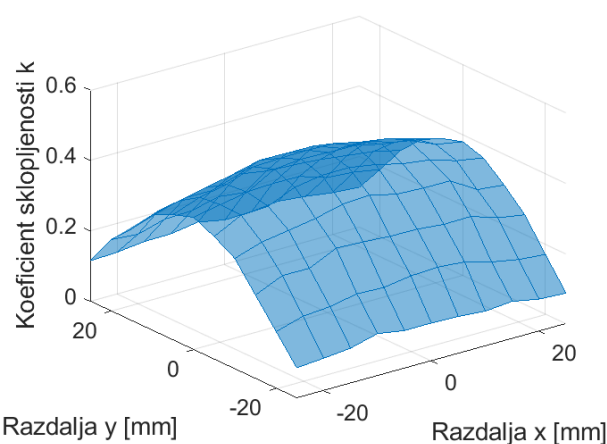
Meritev vpliva nepravnanosti na koeficient sklopljenosti je pomembna za načrtovanje brezžičnih sistemov, ki so odporni na nepravnanost med oddajnim in sprejemnim navitjem. Rezultati meritve so prikazani na sliki 6. Slika 6a prikazuje rezultate meritve za klasični spiralni ploščati navitji in slika 6b prikazuje rezultate meritve za DD navitji.

Meritev je bila v obeh primerih izvedena na fiksni z razdalji, in pri odmiku ± 25 mm v x in y smeri okoli lege, v kateri sta oddajno in sprejemno navitje popolnoma poravnani. Z oddaljenostjo od ravnovesne lege, koeficient sklopljenosti upade. V primeru večje tolerance na nepravnanost, koeficient sklopljenosti upada počasneje.

Na sliki 6a vidimo, da koeficient sklopljenosti v primeru klasičnih spiranih ploščatih navitij upade simetrično. Po drugi strani pa koeficient sklopljenosti v primeru DD navitij ne upada simetrično. Iz slike 6b je razvidno, da koeficient sklopljenosti pri nepravnanosti v x smeri upada



(a)



(b)

Slika 6: Vpliv razdalje med navitji z na koeficient sklopljenosti: (a) klasično spiralno ploščato navitje, (b) DD navitje

veliko počasneje kot v primeru y smeri. Zaradi tega imata DD navitji nesimetrično toleranco na nepravnanost. Vzrok za to nesimetrično toleranco je v usmerjenem magnetnem polju. Nepravnanost po osi, ki je pravokotna glede na smer magnetnega polja, ima manjši vpliv na koeficient sklopljenosti. Po drugi strani, imata klasični spiralni ploščati navitji boljšo toleranco na nepravnanost, kot jo imata DD navitji v primeru nepravnanosti po slabši osi.

Zaradi tega je zelo pomembno, kako orientiramo DD navitji. Lahko se namreč zgodi, da zaradi izbire napačne osi, močno poslabšamo izkoristek sistema za brezžični prenos energije.

5 Zaključek

V tem članku smo predstavili sistem za avtomatizirano meritev koeficienta sklopljenosti navitij sistema za brezžični prenos energije. Na mehanizem sistema namestimo eno oddajno in eno sprejemno navitje, ki jo priključimo na vezje za merjenje medsebojne induktivnosti. S pomočjo računalniške aplikacije se povežemo na mehanizem in na merilni sistem ter določimo vrsto meritve in območje, na katerem bo meritev potekala. Po pričetku meritve, mehanizem pozicionira navitji v prostoru, merilno vezje pa v vsaki točki izvede meritev koeficienta sklopljenosti, sestavljeno iz štirih meritev induktivnosti. Izvedene meritve se prenašajo na računalnik, kjer se lahko dodatno obdelajo in vizualizirajo.

Sistem za meritev koeficienta sklopljenosti lahko uporabimo kakor zamenjavo za rezultate, pridobljene s simulacijskih programov. Meritev je namreč manj časovno zahtevna. Čas simulacije drastično naraste s številom točk.

Delovanje sistema smo prikazali z meritvijo koeficienta sklopljenosti navitij sistema za brezžični prenos energije. Meritev smo izvedli tako na navitju, ki nima in ima usmerjeno magnetno polje.

Literatura

- [1] Mahesh, A.; Chokkalingam, B.; Mihet-Popa, L. Inductive Wireless Power Transfer Charging for Electric Vehicles—A Review. *IEEE Access* 2021, 9, 137667–137713.
- [2] Panchal, C.; Stegen, S.; Lu, J.-W. Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. *Eng. Sci. Technol. Int. J.* 2018, 21, 922–937. [CrossRef]
- [3] Khan, S.R.; Pavuluri, S.K.; Cummins, G.; Desmulliez, M.P.Y. Wireless Power Transfer Techniques for Implantable Medical Devices: A Review. *Sensors* 2020, 20, 3487.
- [4] Jiarui B., Shuyan H., Zibin X., Guangxi H., Ye L., Lirong Z., "Optimization of the Coupling Coefficient of the Inductive Link for Wireless Power Transfer to Biomedical Implants", *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2022, Article ID 8619514, 12 pages, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8619514>
- [5] V. Jiwariyavej, T. Imura and Y. Hori, "Coupling Coefficients Estimation of Wireless Power Transfer System via Magnetic Resonance Coupling Using Information From Either Side of the System," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 191–200, March 2015, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2332056.
- [6] Jeon, Seon-Jae, and Dong-Wook Seo. 2019. "Coupling Coefficient Measurement Method with Simple Procedures Using a Two-Port Network Analyzer for a Multi-Coil WPT System" *Energies* 12, no. 20: 3950. <https://doi.org/10.3390/en12203950>
- [7] Yang, Dongsheng, Sokhui Won, Jiangwei Tian, Zixin Cheng, and Jongho Kim. 2019. "A Method of Estimating Mutual Inductance and Load Resistance Using Harmonic Components in Wireless Power Transfer System" *Energies* 12, no. 14: 2728. <https://doi.org/10.3390/en12142728>
- [8] Alexander, K.C.; Sadiku, N.O.M. Magnetically Coupled Circuits. In *Fundamentals of Electric Circuits*, 3rd ed.; Isenberg, S., Ed.; McGraw-Hill Higher Education: New York, NY, USA, 2007; pp. 528–531.
- [9] Segundo, A.K.R.; Martins, J.H.; Monteiro, P.M.D.B.; De Oliveira, R.A.; Freitas, G.M. A Novel Low-Cost Instrumentation System for Measuring the Water Content and Apparent Electrical Conductivity of Soils. *Sensors* 2015, 15, 25546–25563.
- [10] Budhia, M.; Boys, J.T.; Covic, G.A.; Huang, C.-Y. Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2011, 60, 318–328.