



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

2011.

---

---

---

# A nagyvasúti villamos vontatás hálózati visszahatásának szimulációja

*Doktori értekezés téziszfüzete*

---

---

---

Kiss Péter



# A nagyvasúti villamos vontatás hálózati visszahatásának szimulációja

*Doktori értekezés téziszfüzete*

## Bevezetés

---

A nagyvasúti villamos vontatás táplálási jellemzői Magyarországon: 25 kV, 50 Hz, egy fázis. Az állomások közvetlenül a 120 kV-os főelosztó hálózat vonali feszültségére kapcsolódnak. A vezérelt, majd vezérelt egyenirányítóval felszerelt járművek elterjedése óta igen nagy mértékű a vasúti hálózat harmonikus torzítása, amelynek csökkentésére alkalmazható a felharmonikus szűrés. Kutatásom a kisfrekvenciás vezetett zavarok terjedését és felharmonikus-szűrésének különböző lehetőségeit vizsgálja a vasúti hálózaton. A vizsgálathoz kifejleszttem egy a frekvencia- és időtartományt együttesen alkalmazó számítógépes szimulációs eljárást.

Noha a feszültség minősége, azon belül a hálózati visszahatás témája világszerte sok kutató csoportot foglalkoztat, vasúti alkalmazással egyelőre kevés helyen találkozni. Ennek oka az, hogy a vasúti villamos hálózatok felépítése nem egységes. A közcélú hálózattal azonos frekvenciájú rendszer alkalmazásának úttörője Magyarország, ahol az első teszteket 1923-ban Kandó Kálmán végezte; a világelső ezen rendszerrel villamosított vasútvonal a Budapest-Hegyeshalom közötti, amelynek munkálatai teljesen 1934-re készültek el, első szakaszát Budapest és Komárom között 1932. szeptember 12-én helyezték üzembe. Igaz, hogy egyre több országban ismerték és ismerik fel az 50 Hz-es feszültségű vontatási hálózat jelentőségét, azonban az 1930-as évekre sok országban már túl voltak az első lépéseken, az áttérés pedig hatalmas többletköltséggel járt volna, így Európa fejlettebb, nyugati felében elsősorban egyenáramú hálózatokat alakítottak ki. Kivétel Svájc, Németország és Ausztria hármasa, valamint Norvégia és Svédország, ahol szintén váltakozó áramú, ám  $16\frac{2}{3}$  Hz-es hálózatot használnak (Ausztriában, Németországban és Svájcban 1995. óta 16,7 Hz a frekvencia). Kirívó példa Svájc esete, ahol 1934-re már a vasútvonalak több, mint 60%-ának villamosításával végeztek (és 1960-ra elérték a mai 99,6%-os állapotot). Kandó Kálmán rendszere végül úgy tűnik, mégis meghódítja a világot. Ma már egyértelműen ezt tartják követendőnek az újabb villamosítási projekteknél. Teszik ezt azért is,

mert a vontatási sebesség egyenáramú hálózatok esetén a nagy áramok miatt nem növelhető, így a nagysebességű vonalak az egyenáramú hálózatú országokban is 50 Hz-es rendszerrel épülnek világszerte. A jelenlegi helyzet még egy igen tarka képet mutat. Az országhatárokon sok esetben rendszerhatárt is találunk. [1]

Az IEEE mérnök szervezet ezen területhez tartozó legrangosabb konferenciáinak (az ICHQP, régebben ICHPS sorozat) cikkeit áttekintve nagyon kevés olyannal találkozni, amely a vasúti hálózati visszahatásának modellezésével foglalkozik. A disszertációmban tárgyalt áramkiemelési, és az ebből is adódó hálózati visszahatási probléma a váltakozó áramú vasúti hálózatok sajátossága. A szervezetben leginkább aktív országoknál nem találkozunk 50 Hz-es vasúti hálózattal. Az Egyesült Államokban a villamos vasúti szállítás elenyésző jelentőségű, a nyugat-európai országokban és Japánban alapvetően nem 50 Hz-es rendszerekkel találkozunk, így az utóbbi 20...30 év konferencia kiadványaiban alapvetően magyar, olasz és brit vonatkozású írásokkal találkozni.

A disszertáció első négy fejezete a hálózati visszahatás problémáját tárja fel, továbbá a későbbiekben alkalmazandó modell egységek leképezésének menetét ismerteti, az 5. 6. és 7. fejezet pedig az új eredmények és a hozzájuk kapcsolódó tézisek ismertetésével foglalkozik.

## A kéttartományos szimuláció és alkalmazása

---

A vasút harmonikus visszahatásának leképezésére több modellezési technika is felhasználható:

- Lehetőség nyílik *tisztán frekvencia-tartományban* modellezni. Ez kézenfekvőnek tűnhet, hiszen a hálózat elemei mind a frekvencia-tartományban adottak, ekkor a mozdony –, amelyet a korábbi irodalmak alapján áramgenerátorral helyettesíthetünk – egy előre meghatározott vagy kimért áramspektrummal vesszük figyelembe.
- Számíthatjuk *tisztán időtartományban*. A mozdony leképezése szempontjából teljesen tökéletes megoldás, azonban igen nehézkessé válik a mögöttes hálózat frekvencia függő impedanciájának polinom függvénnyel fel nem írható része, amelyet egy legalább 5-5 pólus-zérus párral rendelkező R-L-C kombinációkkal leképezett időfüggvénnyel tudnánk közelíteni, ami igen megnehezítené, lassítaná a számítást, amelynek pontossága így is kétséges.
- Az általam kifejlesztett ún. *kéttartományos szimuláció (double domain simulation)* a két megoldást ötvözi, megalkotása során egy iterációs eljárást dolgoztam ki, amelyben a mögöttes hálózat, a tápszakas hálózata és az esetlegesen kapcsolódó passzív szűrő a frekvencia-, míg a mozdony és az aktív felharmonikus szűrő az időtartományban számítandó.

Az eredményeket egy iterációs algoritmus futtatása után kapjuk, amely a frekvencia- és időtartomány között konvertálja a feszültség- és áramfüggvényeket. A kéttartományos

szimuláció alkalmazása javasolt a rezonancia frekvencia környékén, ahol különösen számít a hálózat visszahatása a nemlineáris fogyasztó harmonikus áramtermelésére. Eredményei lényegesen pontosabbak, mint egyszerű áramgenerátoros esetben, amikor előzetesen mért áramspektrummal vesszük figyelembe a mozdonyt. Az eljárás segítségével 1...2%-os pontosság akár 3...5 iterációs lépéssel elérhető. Ezen új módszer segítségével bemutatható, hogy egy frekvenciafüggő, nem végtelen hálózathoz (vasúti tápszakaszhoz) kapcsolódó, nemlineáris fogyasztó (mozdony) hálózati áramának spektruma nemcsak a fogyasztó belső impedancia-viszonyaitól, hanem a hálózatra kapcsolódás helyén a frekvenciafüggő mérésponthi impedanciától is függ.

Disszertációm 5. fejezete foglalkozik a kéttartományos szimuláció ismertetésével. A fejezetben áttekintem az elméleti lehetőségeket és más kutatócsoportok által elért eredményeket (5.1), majd részletesen ismertetem az általam kifejlesztett ún. kéttartományos szimuláció módszert és a módszert alkalmazva bemutatom eredményességét (5.2 és 5.3).

Az 5.2 fejezetben bemutatott eljárás újdonsága négy ponton alapul:

1. Egyrészt egy olyan innovatív algoritmust sikerült kidolgozni, amely segítségével egy széles tartományban paramétrezhető modell segítségével tetszőleges mozdony konfiguráció mellett számítható a nagyvasúti villamos vontatás hálózati visszahatása.
2. Másrészt a kéttartományos szimuláció alkalmazásával figyelembe vehető az a tény, hogy az áramirányítóval felszerelt nem áramtartó nemlineáris fogyasztók árama függ a feszültség jelalakjától, amely kölcsönhatásban van az áram jelalakkal.
3. Harmadrészt az eljárás az elektromágneses összeférhetőség témakörében is közvetlenül alkalmazható a vasútvonalak közelében elhelyezkedő távközlési hálózatra gyakorolt zűgászavar pszofometrikus jellemzőinek számítására.
4. Negyedrészt túlmutat az eddigi modellek pontosságán, hiszen minden hálózati elemet a megfelelő környezetben és tartományban számít, egyszerűsítések nélkül a mérési eredmények által lehetővé tett legpontosabb paraméterezéssel.

A kéttartományos szimuláció egy iteratív eljárás, mely során a hálózat a frekvencia- míg a mozdonyok az időtartományban kerülnek számításra. A számítások lényegesen pontosabb, a mérési eredményeket jobban közelítő eredményeket szolgáltatnak a tisztán frekvencia-tartományi számításoknál, kihasználva a korszerű számítástechnikai eszközök nyújtotta lehetőségeket.

Az előzőekben bemutattam a számítás egyszerű menetét, és könnyű áttekinthetőségét, és elemeztem a kapott eredményeket. Megállapítható tehát a következő tézis:

### *I. tézis:*

*A kéttartományos szimuláció módszerének alkalmazásával lehetőség van a nagyvasúti villamos vontatás hálózati visszahatásának meghatározására a hálózat elemeinek eddig ismert legpontosabb leképezésével.*

### *I. tézis 1. altézise:*

*Az áramirányítóval felszerelt nem áramtartó nemlineáris fogyasztók (például a DC motoros mozdonyok) alapharmonikus árama kölcsönösen függ a kapcsain mért feszültség-spektrumtól. A kéttartományos szimuláció módszerével ezen fogyasztók árama tetszőleges pontossággal meghatározható, ennek segítségével a hálózat menti feszültség- és árameloszlás a tisztán frekvencia-tartományi leképezéshez képest lényegesen pontosabban modellezhető.*

---

## Az első tézis gyakorlati alkalmazhatósága

Az eredmények nemcsak a hazai viszonyok között használhatók, hanem valamennyi olyan vasúttársaságnál, ahol az 50 Hz-es középlú hálózathoz kapcsolódó szintén 50 Hz-es vasúti hálózatot alkalmaznak. Az elmúlt évtizedben egyre több országban ismerik fel az egyenáramú hálózat korlátait, ami a gyorsvasúti hálózat kiépítésének akadályává vált. Így Európa-szerte megfigyelhető az a trend, hogy a hagyományosan egyenáramú hálózatú területeken is 25 kV-os 50 Hz-es rendszert telepítenek az újonnan kialakítandó nagysebességű vonalak esetén, a rendszerek közötti átjárás a többáramnemű mozdonyok alkalmazásával minden nehézség nélkül megoldható. A kéttartományos szimuláció algoritmus a következő években tehát egyre több helyen alkalmazhatóvá válik. A pontos szimulációs eredmények a harmonikus szűrés optimalizálás és az optimális vezeték-elrendezés meghatározás szempontjából alapvetően fontosak.

A tézis eredményeit a következő cikkekben publikáltam: [S1]-[S11], [S17]

## A mögöttes hálózat matematikai közelítése

---

Rengeteg kutatás és cikk foglalkozik hálózati modellezéssel, ám annál kevesebb szó esik a mögöttes hálózat figyelembe vételének lehetőségeiről. Az esetek túlnyomó többségében nincsen szükség az elemek frekvenciafüggésének ismeretére, így az alapharmonikus loadflow

számításokhoz elegendő a hálózatot annak zárlati teljesítményéből adódó, a kapcsolódás helyén mérhető mérésponthi impedanciájával helyettesíteni. Ez a technológia kiforrottnak tekinthető, egyszerű matematikai formulával számítható, majd ezt követően a Thèvenin-elv alkalmazásával fizikai modellbe is integrálható.

Amennyiben a számítás célja nemlineáris fogyasztók hálózati visszahatásának meghatározása, a mérésponthi impedanciát nem elegendő az 50 Hz-es mennyiségekkel meghatározni, ebben az esetben az ún. felharmonikus mérésponthi impedancia (FMI) meghatározása szükséges. [3]

Disszertációm 6. fejezetének legfontosabb következtetése az, hogy hálózati visszahatás számításoknál, azaz akkor, amikor a hálózati rezonancia tanulmányozása a cél, lényegesen, akár 2...3%-kal pontosabb eredményt kaphatunk, amennyiben nem hanyagoljuk el a mögöttes hálózat frekvencia-függését. A mögöttes hálózat többféle módon modellezhető, ezt ismerteti a 6.1 fejezet. Az általam alkalmazott polinom-trigonometrikus közelítés (6.2 fejezet) akkor is megfelelő közelítést ad, amikor a felharmonikus mérésponthi impedancia helygörbe mentén nem elég sűrű az ismert értékek halmaza, vagy nem egyenletes a függvény növekménye, ami jelentősen lerontja a tisztán polinomiális interpoláció pontosságát. A módszer további el nem hanyagolható előnye az, hogy számítási igénye lényegesen kisebb, mint például a [25] irodalom által is alkalmazott másodfokú interpoláció. Kettő ( $R$  és  $L$ ) összetett, paramétereivel leírható egyenlettel a teljes tartományban eredményt szolgáltat, míg másodfokú interpoláció esetén minden 3-3 egymást követő pontra szükséges másodfokú függvényt felvenni úgy, hogy a metszet tartományba essék a független változó, amelyet a komplex számok halmazán kell értelmezni.

A 6. fejezetben bemutatottak alapján megállapítható a következő tézis:

---

## *II. tézis:*

*A frekvenciafüggő mögöttes hálózat felharmonikus mérésponthi impedanciájának polinomiális leképezése trigonometrikus függvények hozzáadásával jelentős mértékben pontosítható.*

## *II. tézis 1. altézise:*

*Áramirányítóval felszerelt nem áramtartó nemlineáris fogyasztók esetén a felvett alapharmonikus áram függ a mögöttes hálózat felharmonikus mérésponthi impedanciájának alakulásától.*

## *II. tézis 2. altézise:*

---

---

*Amennyiben a kéttartományos szimuláció módszerével kívánjuk áramirányítóval felszerelt nem áramtartó nemlineáris fogyasztók hálózati visszahatását modellezni, a számítás pontossága függ a polinom/polinom függvénytől fel nem írható mögöttes hálózati felharmonikus méréspontra impedancia leképezésére alkalmazott modell pontosságától.*

---

## A második tézis gyakorlati alkalmazhatósága

A modell kifejlesztésével alapvető célom a kéttartományos szimuláció eredményének pontosítása volt, alkalmazhatósága azonban lényegesen túlmutat ezen. Alkalmazásának fő előnye abban áll, hogy segítségével egyenletekkel nehezen felírható tapasztalati görbéket lehet polinom és trigonometrikus függvények kompozíciójával felírni, ami azután már könnyedén beilleszthető szinte bármilyen matematikai modellbe. Alkalmazása elsősorban akkor célszerű, ha:

- nem egyenletes a függvény növekménye, és/vagy
- a közelítendő függvény mentén kevés adatpontot ismerünk.

Számtalan olyan hálózatszámítási feladat létezik, amikor a mögöttes hálózat leképezése szükséges és a számítást a frekvencia-tartományban célszerű elvégezni. A polinom-trigonometrikus interpoláció háromfázisú hálózatok esetén is alkalmazható, és – ellentétben a kéttartományos szimuláció jelen disszertációjában ismertetett modelljétől – mivel matematikai formuláról beszélünk, alkalmazása nem igényel speciális mérnöki szoftvereket.

A tézis eredményeit a következő cikkekben publikáltam: [S15], [S16], [S19]

## Az alkalmazható szűrési megoldások

---

A 7. fejezetben összefoglaltam a vasúti tápszakasz hálózati visszahatásának csökkentési módszereit, alapvetően a felharmonikus szűrésre fókuszálva. A feladat aktualitását alátámasztja, hogy a 1999-ben életbe léptetett villamosenergia törvény és elszámolási rendelet a MÁV ZRt, mint nagyfogyasztó részére is kilátásba helyezett büntetést a túlzott induktív meddő fogyasztás és a teljes kapacitív termelés után. A tarifarendelet ráadásul azt irányozta elő, hogy a közcélú hálózathoz vételezett induktív, illetve kapacitív meddő villamos energia után külön-külön kell fizetni. [9]

A MÁV ZRt. kutatási-fejlesztési programjában több évtizede szerepel a vasúti villamos vontatás által okozott felharmonikusok és azok hatásainak vizsgálata. Ebben számtalan esetben munkahelyem, a BME Villamos Energetika Tanszék egyik jogelődje, a Villamosművek Tanszék



volt a partnere [9]. A célom egy olyan eljárás kifejlesztése volt, amely segítségével a különböző szűrési módok valóságghűen modellezhetők, az eszközök viselkedése számításokkal meghatározható.

- A 7.1. fejezetben bemutattam, hogy a hálózati visszahatás modellezésére alkalmas kéttartományos szimuláció frekvencia-tartományi modellje kiegészíthető úgy, hogy alkalmas legyen a passzív felharmonikus szűrés vizsgálatára.
- A 7.2. fejezetben a kéttartományos szimuláció eljárásának továbbfejlesztésével lehetőséget teremtettem az aktív felharmonikus szűrés integrálására a modellbe. Amennyiben a valóságghű működés modellezése a cél, az aktív szűrő modelljét éppúgy az időtartományban számíthatjuk előnyösen, mint a mozdonyét.
- A 7.3. fejezetben áttekintettem a két korábbi fejezet megállapításai alapján a hibrid felharmonikus szűrés lehetőségeit. A manapság elsősorban kísérleti fázisban lévő hibrid szűrési stratégiát a vontatási hálózatoknál is haszonnal alkalmazhatjuk.

A disszertáció ezen fejezetében nem célom új szűrőcsoportok tervezése, itt arra szeretnék rámutatni, hogy a kéttartományos szimuláció alkalmas a különböző szűrési feladatok modellezésére is, így a meddőkompenzátor és szűrőtervezés gyors, költségkímélő és hasznos eszköze lehet. Megállapítható tehát a következő tézis:

---

### *III. tézis:*

*A kéttartományos szimuláció módszere kiegészíthető úgy, hogy azzal a passzív, aktív és hibrid felharmonikus szűrés hatását elemezni lehessen.*

- *A passzív szűrőcsoport beilleszthető közvetlenül a frekvencia-tartományi tápszakasz modellbe*
  - *Az aktív felharmonikus szűrő egy mikroprocesszor által vezérelt áraminjektáló berendezés, amelyet előnyös a mozdonyhoz hasonlóan az időtartományban számítani. A kéttartományos szimuláció algoritmusát módosítva lehetőség nyílik az aktív szűrés vizsgálatára. Az így kialakuló eljárás az ún. kétkörös kéttartományos szimuláció, amely alkalmas az aktív szűrő méretezésére*
-

- *A hibrid szűrés a passzív és aktív szűrés együttes alkalmazása. A kétkörös kéttartományos szimuláció tápszakasz modellje kiegészíthető passzív szűrőcsoporttal, így a hibrid szűrés hatása is könnyedén vizsgálható és mindkét szűrő méretezhető.*
- 

## A harmadik tézis gyakorlati alkalmazhatósága

A kéttartományos szimuláció tehát nemcsak a vasúti vonatás hálózati visszahatásának modellezésére alkalmas, hanem arra is, hogy a különböző szűrési módszerek hatékonyságát vizsgálják vele. A szimuláció pontossága minden esetben az adott elemek pontosságán múlik.

- Passzív szűrők esetén az alkotó R, L, C elemek pontos ismerete szükséges (ide értve az tekercs és kondenzátor veszteségi ellenállást is).
- Aktív szűrés megvalósítható első közelítésben ideális áramgenerátorokkal is, azonban a szimuláció lehetőséget nyújt az ISZM vezérlés valósághű megvalósítására. Amennyiben ismerjük egy konkrét szűrő paramétereit és szabályozási hatásvázlatát/programját, megalkothatjuk az IGBT-k vezérlésére szolgáló programkódot is. Így az aktív felharmonikus szűrés is megfelelő pontossággal modellezhető.
- A hibrid szűrés sok szempontból még kísérleti stádiumban van, ám az előző két pont együttes figyelembe vételével nagy pontossággal modellezhető.

A modellalkotás célja esetünkben az, hogy a különböző szűrési megoldások még a tervezőasztalon vizsgálhatók legyenek, a szimuláció a beruházást megelőző számításokat (tanulmányokat) támassza alá, végső soron segítsen kiválasztani az optimális megoldást abban az esetben, ha több változat is szóba kerülhet. A kétkörös kéttartományos szimulációnak nem célja a költséghatékonyság elemzése. Segítségével az efféle tanulmányok műszaki célú vizsgálatait lehet elvégezni előre meghatározott tápszakasz paraméterek és akár több mozdony konfiguráció mellett abban az esetben, ha az alkalmazandó szűrők modelljei adottak.

A tézis eredményeit a következő cikkekben publikáltam: [S10]-[S14], [S18]

## Publikációs lista

---

- [S1] Kiss Péter: *A nagyvasúti villamos vontatás hálózati visszahatásának számítógépes modellje*, BME-VIK Tudományos Diákköri Konferencia kiadványában, Budapest, Magyarország, 2004/2005. tanév.
- [S2] Kiss Péter: *A nagyvasúti villamos vontatás hálózati visszahatásának számítógépes modellje*, X. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka kiadványában, Kolozsvár, Románia, 2005. márc. 18-19.
- [S3] Kiss Péter: *A nagyvasúti villamos vontatás hálózati visszahatásának számítógépes modellje*, LII. MEE Vándorgyűlés kiadványában, Eger, Magyarország, 2005. aug. 24-26.
- [S4] Kiss Péter: *A nagyvasúti villamos vontatás hálózati visszahatásának számítógépes modellje*, Elektrotechnika, 12. kötet, 325-327. oldal, 2005.
- [S5] Dán András, Kiss Péter: *A nagyvasúti villamos vontatás hálózati visszahatása*, XI. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka kiadványában, Kolozsvár, Románia, 2006. március 24-25.
- [S6] András Dán, Péter Kiss: *Effect on Power Quality of the High Power Electric Traction (Double Domain Computer Simulation vs. Site Measurements)*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality kiadványában, Palma de Mallorca, Spanyolország, 2006. ápr. 5-7.
- [S7] András Dán, Péter Kiss: *Effect on Power Quality of the High Power Electric Traction (Double Domain Computer Simulation vs. Site Measurements)*, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics kiadványában, Lund, Svédország, 2006. jún. 12-14.
- [S8] András Dán, Péter Kiss: *Advanced Calculation Method for Modeling of Harmonic Effect of AC High Power Electric Traction*, 12<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power kiadványában, Cascais, Portugália, 2006. okt. 1-5.
- [S9] András Dán, Péter Kiss: *Modelling of High Power Locomotive Drives for Harmonic Penetration Studies*, The First International Meetings on Electronics & Electrical Science and Engineering kiadványában, Dzselfa, Algéria, 2006. nov. 4-6.
- [S10] Péter Kiss, András Dán: *Novel Simulation Method for Calculating the Harmonic Penetration of High Power Electric Traction*, 1st International Youth Conference on Energetics kiadványában, Budapest, Magyarország, 2007. máj. 31-jún. 2.
- [S11] Péter Kiss, András Dán: *Novel Method for Modelling and Calculating the Harmonic Effect and Psophometric Disturbance of High Power Electric Traction*, 7th International

- Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology kiadványában, Szentpétervár, Oroszország, 2007. jún. 26-29.
- [S12] Péter Kiss, Attila Balogh, András Dán, István Varjasi: *The Application of Active Filters Supported by Pulse Width Modulated Inverters in the Harmonic Simulation of the High Power Electric Traction*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality 2008 kiadványában, Santander, Spanyolország, 2008. márc. 12-14.
- [S13] Péter Kiss, András Dán: *The Application of the Double Domain Simulation by Different Harmonic Filtering Methods of 25 kV Electric Traction Systems*, 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power kiadványában, Wollongong, Ausztrália, 2008. szept. 28-okt. 1.
- [S14] Kiss Péter, Dán András: A vasúti hálózatok hibrid felharmonikus szűrésének modellezése a frekvencia/idő tartománybeli szimuláció módszerével, *Elektrotechnika*, 11. kötet, 14-16. oldal, 2008.
- [S15] Péter Kiss, András Dán: *Novel Analytical Approximation Method of Frequency Dependent Thévenin Impedance*, IEEE Bucharest PowerTech kiadványában, Bukarest, Románia, 2009. jún. 28-júl. 2.
- [S16] Kiss Péter: *A frekvencia-függő Thévenin impedancia analitikus közelítése új módszerrel*, XV. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülészaka kiadványában, Kolozsvár, Románia, 2010. márc. 25-26.
- [S17] Péter Kiss, Gergely György Balázs, András Dán, István Schmidt: *The Application of the Double Domain Simulation with PWM Controlled Locomotives*, 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power kiadványában, Bergamo, Olaszország, 2010. szept. 26-29.
- [S18] Péter Kiss, András Dán: *Modelling and Calculating the Harmonic Penetration of the High Power Traction Using the Double Domain Simulation Method*, *Periodica Polytechnica*, 2011.
- [S19] Péter Kiss, András Dán: *Novel Mathematical Approximation Method for the Upstream Network Representation*, *Electrotehnica Electronica Automatica*, 3. kötet, 2011.

## Irodalomjegyzék

---

- [1] Kiss Péter: *Egy világsiker titkai - Kandó Kálmán és a villamos vasúti vontatás*, XXVII. Országos Tudományos Diákköri Konferencia, Társadalomtudományi Szekció kiadványában, Budapest, 2005., 330. oldal.
- [2] Jklamo: (2007. július 31.), Wikipedia, Európa vasútvillamosítási rendszereinek listája cikk. [Online].  
[http://hu.wikipedia.org/wiki/Eur%C3%B3pa\\_vas%C3%BAtvillamos%C3%ADt%C3%A1si\\_rendszereinek\\_list%C3%A1ja](http://hu.wikipedia.org/wiki/Eur%C3%B3pa_vas%C3%BAtvillamos%C3%ADt%C3%A1si_rendszereinek_list%C3%A1ja)
- [3] Dán András, Tersztyánszky Tibor, és Varjú György: *Villamosenergia minőség*. Budapest, Magyarország: Invest-Marketing Kft., 2006.
- [4] Dán András, Varjú György: *Felharmonikus szűrés és alapharmonikus meddőteljesítmény kompenzáció. Alkalmazás a nagyvasúti villamos vontatási alállomásban*, Elektrotechnika, 10-11. kötet, 394-404. oldal, 1988.
- [5] Csáki Frigyes, Ganszki Károly, Ipsits Imre, és Marti Sándor: *Teljesítményelektronika*. Budapest, Magyarország: Műszaki Könyvkiadó, 1973.
- [6] Ned Mohan, M. Tore Undeland, és William P. Robins: *Power Electronics*, 3. kiadás. Hoboken, Amerikai Egyesült Államok: John Wiley & Sons Inc., 2003.
- [7] Varjú György: *Erősáramú vezetékek távközlő kábelekre gyakorolt induktív hatásának számítási modelljei*, BME EI Villamosművek Tanszék, Budapest, Kandidátusi disszertáció 1989.
- [8] *Inducing currents and voltages in power transmission and distribution systems*, ITU-T Directives Volume V, 2005.
- [9] Dán András, Földházi Pál, Oláh András, és Varjú György: *Felharmonikus-szűrés és a meddőteljesítmény-kompenzáció helyzete a MÁV villamos alállomásain I, II, III.*, Vezetékek Világa, 1999/3, 2000/1, 2000/3. kötet, 1999-2000.
- [10] Bakos István, Horváth Viktor, és Szalay József: *A 2x25 kV-os nagyvasúti villamosenergia-ellátás hazai rendszerterve*, Elektrotechnika, 7. kötet, 245-251. oldal, 1987.
- [11] Varjú György: *Villamos vasutak által távközlő rendszerekben okozott indukáló hatást meghatározó jellemzők vizsgálata*, BME Villamos Energetika Tanszék, Budapest, Kutatási

jelentés 2009.

- [12] Tanczer György: *Megtervezendő egy kétvágányú villamosított vasútvonal 25 kV, 50 Hz-es felsővezeteki hálózaton beépített kapcsoló berendezés komplex belső automatikai rendszere*, BME EI Villamosművek Tanszék, Budapest, Magyarország, Diplomaterv 1979.
- [13] *A közcélú elosztóhálózatokon szolgáltatott villamos energia feszültségjellemző*, MSZ 50160, 1995. december.
- [14] György Varjú: *Inducing currents and voltages in the case of a.c. electrified railway systems*, COM V-54, 6. kötet, 1986. december.
- [15] Varjú György: *Villamos vasút zavaróárama és hálózati visszahatása V63 sorozatú tirisztoros mozdony esetén. Számítógépi számítási módszer távközlő kábelek zavarásának vizsgálatára*, BME EI Villamosművek Tanszék, Budapest, Kutatási jelentés 1980.
- [16] Horváth Viktor, Zádori Zoltán, szerk.: *Villamos mozdonyok műszaki leírása és kezelési utasítása a mozdonyvezetők részére*. Budapest, Magyarország: Közdok, 1983.
- [17] *A V43. sor. mozdony villamos berendezésének műszaki leírása, kezelési és karbantartási utasítása*. Budapest, Magyarország: Ganz Villamossági Művek, 1971.
- [18] Mezei István, szerk.: *A V63 sorozatú mozdony szerkezete, működése és kezelése*. Budapest, Magyarország: MÁV Rt., 1998.
- [19] Hunor László, Mezei István, szerk.: *A V46 sorozatú villamos tolatómozdony szerkezete és kezelése*. Budapest, Magyarország: Közdok, 1993.
- [20] Előhegyi István: *Aszinkron motoros villamosmozdonyok*. Budapest, Magyarország: MÁV ZRt., GySEV ZRt., 2002.
- [21] Előhegyi István: *Taurus - Korszerű villamosmozdonyok*. Budapest, Magyarország: MÁV ZRt., 2009.
- [22] Retter Gyula: *Villamosenergia-átalakítók 1.* Budapest, Magyarország: Műszaki Könyvkiadó, 1986.
- [23] Federica Foiadelli, Pablo Pinato, és Dario Zaninelli: *Statistical Model for Harmonic Propagation Studies in Electric Traction Supply Systems*, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power kiadványában, Lake Placid, Amerikai Egyesült

- Államok, 2004. szept. 12-15.
- [24] Roberto Langella, Adolfo Sollazo, és Alfredo Testa: *Modeling Waveform Distortion Produced by DC Locomotive Conversion System*, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power kiadványában, Lake Placid, Amerikai Egyesült Államok, 2004. szept. 12-15.
- [25] Lihua Hu, R. E. Morrison, és David J. Young: *Reduction of Harmonic Distortion and Improvement of Voltage Form Factor in Compensated Railway Systems by Means of a Single Arm Filter*, 5th International Conference on Harmonics in Power Systems kiadványában, Atlanta, Amerikai Egyesült Államok, 1992. szept. 23-25., 83-88. oldal.
- [26] Varjú György, Janklovics Zoltán: *A V63 sorozatú tirisztoros mozdony zavaró áramának mérése*, PKI Posta Kísérleti Intézet, Budapest, Kutatási jelentés 1982.
- [27] Geszti Pál Ottó: *Villamosművek I.* Budapest, Magyarország: Tankönyvkiadó, 1967.
- [28] Dán András, Varjú György: *Csillapító és szűrő alkalmazása villamos vasút felharmonikusainak csökkentésére és meddőteljesítmény kompenzálására*, BME EI Villamosművek Tanszék, Budapest, Kutatási jelentés 1986.
- [29] Obádovics József Gyula: *Matematika*, 14. kiadás. Budapest, Magyarország: Scolar Kiadó, 1994.
- [30] Ionel Urdea Marcus, Anca E. Nestor, és Paul Clarkson: *The Influence of the Network Impedance on the Nonsinusoidal (Harmonic) Network Current and Flicker Measurements*, IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2011.
- [31] Földházi Pál, Oláh András: *A felharmonikus-szűrés és a meddőenergia-kompenzálás tapasztalatai*, Vezetékek világa, 2002/1. kötet, 23-31. oldal, 2002.
- [32] Marcell Revisnyei, István Varjasi, Attila Kárpáti, és Imre Hermann: *Investigation of Harmonic Currents of Single Phase Bridge Converter with Digital PWM*, PEMC '98. kiadványában, Prága, Csehország, 1998. szept. 8-10., 6.89-6.93. oldal.

