

Opponensi vélemény

Gyimóthy Szabolcs okl. villamosmérnök

„Speciális kontinuummodellek az alkalmazott elektrodinamikában

c. MTA doktori értekezéséről

Készítette: Augusztinovicz Fülöp okl. villamosmérnök, az MTA doktora

Gyimóthy Szabolcs a BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszéken több évtized óta sikeresen működő, az elektromágneses terek numerikus szimulációjával foglalkozó iskola oszlopos tagja, vezető kutatója. Munkássága során e téma különböző részterületein végzett kutatásokat, amelyeket korábban PhD értekezésében (2004) és habilitációs téziseiben (2014) foglalt össze. A jelen bírálat tárgyát képező MTA doktori értekezése döntő részben a habilitációt követő 6 év termését mutatja be 3 tézisben és ezek altéziseiben, a hozzájuk szorosan kapcsolódó közel 20 színvonalas publikációban.

Részletes bírálati megállapítások

A jelölt értekezésben tárgyalt vizsgálatai az elektromágneses térszimuláció kimerítően kutatott és igen bő szakirodalmán belül három témát ölelnek fel: a vezeték nélküli energiaátvitel veszteségeinek elemzését, szupravezető szalagtekercsek vizsgálatát és mozgó kontinuum álló kontinuummal való helyettesítését. Míg a harmadik téma elsősorban elméleti jelentőségű, az első kettő gyakorlati fontosságához és egyben korszerűségéhez semmilyen kétség nem fér. Bár az egyes témák látszólag távoliak, közös elemük és vezérfonaluk a végeselem módszer homogenizációs eljárásainak és speciális kontinuummodelljeinek kidolgozása és alkalmazása.

A szerző mindhárom részben hasonló megközelítést alkalmaz: a számítások fő munkaeszköze (számítástechnikai nyelven szólva a *software engine*) minden esetben a fizika és a mérnöki tudományok számos területén sikerrel alkalmazható, kvázi univerzális numerikus programcsomag (COMSOL Multiphysics). Az elemzések legfontosabb és az újdonságot jelentő lépései ugyanakkor az egyes problémák olyan leegyszerűsítése a térelmélet magasszintű matematikai tárgyalása és a mérnöki szemlélet és a gyakorlati szempontok ötvözésével, ami lehetővé teszi a feladat átadását egy standard megoldó programcsomag felé, amit így a legjobb értelemben vett *user interface*-nek is tekinthetünk.

A 2. fejezet az egymástól elszigetelt vezetősálakból sodrott kábelekkel (az ún. litze huzalokkal) foglalkozik, elsősorban annak érdekében, hogy az ilyen anyagból készült tekercs veszteségei számíthatók és optimalizálhatók legyenek. Felesleges hangsúlyozni ennek gyakorlati jelentőségét, hiszen egyre-másra jelennek meg vezeték nélküli teljesítmény-átvivő szerkezetek a mobiltelefon töltőktől kezdve az elektromos autók akkumulátorainak kényelmes töltését biztosító rendszerig. Ez a feladat különösen alkalmas egy új, hatékony többlépcsős eljárás kidolgozására, melynek részeként először egy nagy léptékű modellt alkotnak, majd

áttérnek a közepes léptékű, végül az elemi szálak kis léptékű modelljének vizsgálatára. Az értekezésben bemutatott eljárás újdonsága abban van, hogy a közepes léptékű modell a huzal kötegrendjének megfelelően további alszintekre tagolódik. A magasabb szinten kiszámított árameloszlást az eggyel alacsonyabb szint számára gerjesztésként előírva végül eléri az elemi szálak szintjét. A meglehetősen összetett eljárás menetét a rendkívül világos 2.8 ábra mutatja be, amelyben a követendő lépések sorrendjén és kapcsolódásán túlmenően jól megmutatkozik a módszer komplexitása is: az egyes számítási lépések kvázianalitikus, két- és háromdimenziós numerikus eljárással valósulnak meg.

Az elemzés számos lépésen át, különböző feltételezésekkel és egyszerűsítésekkel, de jól követhetően mutatja be a kötegszintű, a kötegen belüli, majd végül az elemi szálban kialakuló áramkiszorítás jelenségét és az ebből levezethető árammegoszlás számítását. Nem igazán plauzibilis, de kellően megmagyarázott és később mérésekkel is igazolt az a valóban meglepő megállapítása, hogy bizonyos feltételek mellett a középső alköteg árama a periférikus kötegekével éppen ellenkező irányú. Az ilyen módon létrejövő áramkiszorítás végeredményben a vezeték ellenállásának növekedését eredményezi (ld. a kötegszintű áramkiszorítás hatásaként létrejövő ellenállás-növekedést a 2.11 ábrán), és mint ilyen, fő összetevője a veszteségnek; végső soron ennek csökkentése a tervezés célja. Ezt a veszteséget érdemes összetevőkre bontani, hogy a különböző örvényáram-összetevők hatását feltárhassuk és ezzel tervezési előnyhöz jussunk. A szerző itt, és később másutt is számos, a tervezést érintő hasznos megállapítást tesz.

A 2.7 szakaszban bemutatott elemzés végeredményét a 2.84 képlet foglalja össze, melynek gyakorlati alkalmazását egy vezeték nélküli gépkocsiakkumulátor töltő (pontosabban a járműbe szerelendő tekercsmódul) példáján a 2.8 fejezet mutatja be. Igen érdekes az a vizsgálat, amelyben a modult kétféle kötegelésű huzallal hajtják végre. A szerző a számítást a korábban ismertetett eljárással, a 2.8 ábra jelentős leegyszerűsítésével kapható, 2.14 ábrán bemutatott folyamatábra szerint végzi el és az eredményt a 2.20 ábrán ismerteti. Ezt az eredményt méréssel is összevették és kielégítő egyezést kaptak (ld. 2.22 ábra). Nem teljesen érthető ugyanakkor az a megjegyzés, hogy mivel a kétféle huzalra kapott eredmény eltérését a BLSE (*bundle level skin effect*, kötegszintű áramkiszorítás) okozhatja, így ez a megoldás jelenleg a BLSE mérés egyetlen járható útja. (Minden vizsgálandó tekercset két, esetleg több huzalból el kell készíteni és a kapott impedancia-görbéket összevetni?)

A 3. fejezet a szalagtekercsek vizsgálatával foglalkozik, melynek hangsúlyos eleme a szimuláció hatékonyabbá tétele érdekében alkalmazott homogenizálási eljárás. A 2. fejezetben vizsgált rendszerek jellemzői és paraméterei itt tovább bővülnek nemlináris és csatolt hőtani-elektromágneses jelenségekkel (jelesül a magas hőmérsékletű szupravezető – HTS – tekercsek esetében), ezeket azonban az értekezés nem fejti ki részletesen.

A szakirodalomban háromféle geometriai modellt alkalmaznak (ld. a 3.2 ábrán). A leghatékonyabb a homogenizált vagy kontinuummodell, az ismert megoldásokban azonban azonban olyan kötegelt vezetők jelennek meg, amelyben az egyes menetek zárt, független hurkokat alkotnak. A jelölt által kidolgozott eljárás kiküszöböli ennek hátrányait és egy olyan ekvivalens, anizotrop vezetőképesség-tenzort alkalmaz, melynek főirányai illeszkednek a spirális geometriához. Az elméleti bevezetés után, a szakirodalomban is ismert $\mathbf{A-V}$, \mathbf{A} formalizmussal közelíti meg a problémát. Egy egyszerű elrendezést vizsgál (ld. a 3.5 ábrán), de újszerű módon implementálja a gerjesztést (feszültségkényszert alkalmaz) és a végeselemes implementációban nem a szokásos élváltozójú, hanem csomóponti változókat használ. A részletes és a homogenizált modellek összevetését a végeselemes implementáció

különböző paramétereivel elvégezve kimutatja, hogy a spirálisan homogenizált végeelem modell jóval hatékonyabb a menetszinten diszkretizált modellnél, ugyanakkor sokkal jobb közelítést nyújt, mint a hasonlóan hatékony hengeresen homogenizált modell.

A második generációs HTS szupravezetőkből készült tekercsek technológiai okoknál fogva rendszerint szalagtekercs formájában készülnek. Az értekezés ezt a témát meglehetősen röviden érinti, amit bizonyára iparjogvédelmi szempontok indokolnak. Ennek az elemzésnek az újdonságát az időtartománybeli tranziens számítása jelenti, bár a közben változó hőmérséklet szerinti függést nem veszi figyelembe. A kapott eredmények nehezen kontrollálhatók, mivel mérésekre itt nem volt lehetőség és a szakirodalmi adatok másféle gerjesztésre vonatkoznak.

A 4. fejezet a stacionárius közegmozgás elektromágneses modelljének nyugvó közeg ekvivalens modelljévé történő átalakítását ismerteti. A kidolgozott eljárás itt is a szakirodalomból ismert alapokra épül, de a parciális differenciálegyenletek közvetlen átalakítása következtében nem határoz meg helyettesítő anyagjellemzőket, és optimalizálja a végeelem módszer implementációját.

Szellemes megoldás a számítás alapját képező parciális differenciálegyenlet olyan felírása, melyben a konvekciós tagot a diffúziós tagba „olvasztja”. Az eredményként kapott PDE gyenge alakját alkalmasan választott peremfeltétellel olyan alakra hozza, ami megoldható a szokásos solverekkel (így a COMSOL Multiphysics csomaggal is). A módszer egy fiktív forrás létrejöttét eredményezi. Az eljárás alkalmazását két tesztfeladaton is bemutatja: a csúszó érintkezők erősen leegyszerűsített modelljén és a forgó szigetelőhengeren fellépő radarszórás számításán. A kapott eredmények mindkét esetben plauzibilisek, bár közvetlen mérési adattal vagy más szakirodalmi forrással való összehasonlítást csak röviden érint.

A tézisek bírálata

Bár mindhárom tézis erős, kellően meggyőző és jól publikált, az értekezés legértékesebb részének a 2. fejezetet tartom, ami az első tézis és három altézis formájában nyer megfogalmazást. Ezt a téziscsoportot változatlan formában új tudományos eredménynek tekintem és elfogadom.

A második tézis és altézisei vékony szalagból készült áramvezető tekercsek háromdimenziós végeelemes számításához adnak újszerű, homogenizált modellt. Bár a tézis fő alkalmazásként a magas hőmérsékletű szupravezetőből készült hengeres spirálszalag-tekercsreklémia említ, ez az értekezés főszövegéből nem tűnik ki (ennek feltehető oka a már említett iparjogvédelmi aspektus), miközben az altézisek jóval bővebb megfogalmazásúak. Ezt a tézist is elfogadom új tudományos eredménynek, de a négy altézis rövidítését és összevonását lehetségesnek és célszerűnek tartanám.

A stacionárius közegmozgás elektromágneses modelljének nyugvó közeg modelljévé történő átalakítása a harmadik tézis és altéziseinek témája. Ennek legfontosabb újdonsága egy fiktív felületi forrás felvétele, ami szellemes és hatékony megoldás és lehetővé teszi standard végeelemes kód alkalmazását. A tézist és altéziseit új tudományos eredménynek tekintem és elfogadom.

Általános értékelés

A dolgozat – jó egyetemi oktatóhoz méltóan – nagyon jó didaktikus érzékkel felépített munka, így az elektrodinamikai szimulációk témájában kevésbé járatos olvasó viszonylag csekély fáradtsággal, a kimerítő matematikai levezetések lekövetése nélkül is képes a vizsgált rendszerek és jelenségek megértésére. Ebben nagy segítségére vannak a nagyon szemléletes, színeket is bőségesen alkalmazó ábrák és az informatív ábrafeliratok és - aláírások. (A szerző szerényen említi ugyan a 2. fejezet elején, hogy az ábrák javarészt az alkalmazott szoftver postprocessing moduljával készültek, de a kiegészítő információk nélkül kevésbé lennének annyira szemléletesek és hasznosak.) Kiemelendő továbbá az értekezés magyaros, csak a legszükségesebb idegen szavakat és kifejezéseket alkalmazó, csiszolt és gördülékeny, helyenként kifejezetten olvasmányos stílusa.

Összefoglalás

Megítélésem szerint az elektromágneses szimulációs technikák szerző által alkalmazott megközelítése a magas elméleti színvonal. mellett jól használható eszközt ad a gyakorló szakemberek kezébe, ami a munkát különösen értékesé teszi.

Ennek, valamint a fent részletezett szempontok és értékelés alapján a doktori művet **nyilvános vitára alkalmasnak tartom** és az MTA doktora fokozat odaítélését melegen ajánlom.

Budapest – Szentendre, 2021. május 17.

Augusztinovicz Fülöp

Augusztinovicz Fülöp