

Válasz Dr. Kuczmann Miklós opponensi véleményére

Nagyon köszönöm az értekezés alapos átnézését, valamint a lényeges észrevételeket, kérdéseket tartalmazó véleményt. Az alábbiakban először a specifikus kérdésekre adom meg a választ a vonatkozó tézisek (fejezetek) szerinti bontásban, majd az átfogó kérdésre válaszolok (az idézett opponensi kérdést *dőlt betűs* szedés emeli ki).

1. tézis (2. fejezet)

a) *Az egyre finomított és egyre több hatást figyelembe vevő modellekkel számított részeredmények mennyire hatnak vissza a korábbi, kevésbé aprólékos modellel számított eredményekre? Egyáltalán érdemes ezzel foglalkozni?*

A kérdés jogos, mivel a homogenizáció „klasszikus” alkalmazásában az elemi cella mérete általában nagyságrendekkel kisebb, mint a vizsgált elrendezés átfogó méretei, így az általa okozott perturbáció visszahatása elhanyagolható. Ezzel szemben – a kérdés nyilván erre céloz – a dolgozatban javasolt módszer több lépésben fokozatosan, viszonylag kis méretugrásokkal finomítja az áramképet. A visszahatás elhanyagolása ez esetben elsősorban *hipotézis*, amellyel hatékonyan kezelhetővé válik egy rendkívül összetett probléma, és amelyet ugyanakkor alátámasztanak (de legalábbis nem cáfolnak) a mérési eredmények. Mindazonáltal hipotézisünk többé-kevésbé fizikailag is megalapozott:

- A finomítást mint változást *forrásnak* tekintve, annak hatása a kvázi-stacionárius térben a távolsággal gyorsan csillapodik, hovatovább vezető közegben exponenciális ütemben csökken. Figyelembe véve, hogy a vizsgált kábel átmérője a behatolási mélység sokszorososa, a perturbáció hatása érdemben legfeljebb a szomszédos alkotégek, illetve szálakra terjedhet ki.
- A finomítás során az áramkiszorítás (SE) figyelembevételére önmagában körszimmetrikus jellegű áramképváltozást jelent, mégpedig változatlan összáram mellett, amely lényegében nem érezteti hatását az adott szálon, illetve kötegen kívül.
- A közelségi hatást (PE) kiváltó, kollektív eredő mágneses térhez az adott szál, vagy akár alkoteg járuléka jellemzően csekély [1]. Ráadásul a PE a szál-, illetve köteg-keresztzetben antiszimmetrikus áramképváltozást okoz, amelynek vonaldipólus jellegű tere magasabb rendben csökken a távolsággal, mint a vonalforrása, ezért visszahatása még inkább elhanyagolható.

b) *A fejezet végén említi, hogy további szimulációkat igényelne a modell pontosítása. A 2.21. ábrán felvázolt részeredmények mennyiben segítik a modell pontosítását? Hogy dönthető el, hogy a részellenállások (összetevők) értéke külön-külön helyes?*

- A fejezet végi megjegyzés arra utal, hogy a számítás során – egy előzetes becslésre alapozva – nem vettük figyelembe az 1. szinten a kötegbeli áramkiszorítást, és feltehetően ez okozza a mért és számított görbék közötti jellegzetes eltérést 100 kHz környékén. Mivel az eszköz 85 kHz-en üzemel, ezért a modell pontosítására végül nem fordítottunk energiát.

- A részellenállások helyességének ellenőrzése mérés technikai kérdés, amelyhez viszont támpontot ad a 2.20. és 2.21. ábrán bemutatott felbontás. Egyes komponensek elkülönítésére ugyanis kihasználható frekvenciafüggésük jellege (pl. R_{DC} frekvenciafüggetlen, R_{BLSE} szigmoid, R_{SLSE} és R_{SLPE} exponenciális, stb.), különösen ha eltérő frekvenciákon lépnek fel. Ennél általánosabb, habár megfontolást igénylő és néha drága módszer, ha veszünk két különböző huzal-, illetve tekercskonstrukciót, amelyek ellenállása – legalább közelítőleg – éppen a keresett komponensben különbözik egymástól. A dolgozatban példa erre a köteggközi áramkiszorítás (BLSE) ellenállás-járuelékának mérése, de hasonlóan mérhető például az alumínium lemez veszteségének megfeleltetett ellenállás is.

c) *Itt egy direkt feladat megoldását láttuk. Hogy lehet elképzelni, hogy a módszert a tekercselrendezés tervezésére használjuk?*

A tervezés szempontjából legfontosabbnak a bevezetett aszimptotikus jellemzőket, illetve azok geometriától és anyagjellemzőtől való függését tartom; továbbá közvetve kihasználhatók a bizonyított teljesítményortogonalitási tulajdonságok. A teljes direkt modell beágyazása egy optimalizációs ciklusba talán túl nagy erőforrást igényelne, azonban a tekercskonstrukció egyes jellemzői (pl. a huzal köteggrendje, a beépítési környezet, stb.) külön-külön is hatékonyan optimalizálhatók.

2. tézis (3. fejezet)

a) *Érdekes, hogy nem említi a \mathbf{T}, Φ formalizmust. Számomra ez egy kedvelt módszer örvényáramú problémák megoldására. Érdekel, miért nem került itt bemutatásra.*

Ismeretes, hogy a magneto-kvázistacionárius problémák véges elemes számítására – a variánsokkal együtt – tíznél is több különböző formalizmus létezik [2], ebből a dolgozatban kettőt (\mathbf{A}, V és \mathbf{H}) mutatok be, valamint említést teszek a hibrid \mathbf{A}, \mathbf{T} formalizmusról. A választásom egyik oka, hogy a HTS modellezésben ezek terjedtek el leginkább (a \mathbf{H} formalizmus implementálását a Comsol Multiphysics szoftverben történetesen a szupravezető-modellezés motiválta). A másik ok a két formalizmus komplementer volta pl. a feszültség- ill. áramkényszer és a folytonossági feltételek vonatkozásában. Megjegyzem, hogy a \mathbf{H} formalizmus a \mathbf{T}, Φ igen közeli rokona – ha úgy tetszik, variánsa – amely hasonló előnyökkel és hátrányokkal bír az adott alkalmazásban, ezért az utóbbi külön tárgyalását nem tartottam fontosnak.

b) *A 3.4.3. fejezetben a véges elemes implementációt ismerteti. Itt a csomóponti elemekkel történő megoldást mutatja be. Váolja fel, hogy lehetne az élelem alapú megoldást alkalmazni a feladat megoldásában.*

Az \mathbf{A}, V módszernél hagyományosan él-elemet használnak az \mathbf{A} vektorpotenciál, míg csomóponti elemet a V skalárpotenciál diszkretizálására; a csomóponti elemek kizárólagos használata a munkámban implementációs kényszer volt (l. a következő pontot). A javasolt homogenizációs eljárás elve azonban független ettől az implementációtól, azaz minden további nélkül megvalósítható él-elemek használatával is. Ez esetben a dolgozatban leírt implementációhoz képest elsősorban a határ- és peremfeltételek előírásán kell módosítani. Megjegyzendő, hogy az él-elemek egyik legfőbb előnye, hogy általuk egyszerűen előírhatók a mágneses tér folytonossági feltételei az eltérő permeabilitású közegek határán, azonban a vizsgált elrendezésben erre nincs szükség, mivel az elrendezés mágneses szempontból homogénnek tekinthető.

c) *Technikai jellegű kérdés: a használt COMSOL Multiphysics 5.2. nem teszi lehetővé az élelem alkalmazását? Próbálták a weak form környezetet? A 3.5. verzióban ez még rendelkezésre állt, és nagyon hatékonyan lehetett alkalmazni.*

- Az említett szoftverben a csomóponti mellett implementálva vannak az él bázisú véges elemek is, azonban időtartománybeli (tranziens) analízis esetén nem kombinálhatók olyan közegmodellel, amely egyszerre anizotrop és nemlineáris tulajdonságú.
- A Comsol Multiphysics a probléma definiálásánál – az alapértelmezett „fizikai” megközelítés mellett – lehetővé teszi az egyenlet alapú, „matematikai” megközelítést (*equation based modeling*) is [3]. Ennek része az említett *weak form* környezet, amely a hozzáférés legalacsonyabb, egyszerűsített legrugalmasabb konfigurálható szintjét jelenti. Ez utóbbival minden bizonnyal megkerülhető a fenti implementációs korlát. A módszer fejlesztése során azonban törekedtem arra, hogy azt a szoftverben a lehető legmagasabb szinten implementáljam. Ennek az egyszerűség és áttekinthetőség mellett „pedagógiai” oka is volt: a fejlesztés hallgatók bevonásával történt.

d) *A legtöbb szupravezető alkalmazás a vezetőképesség nemlineáris tulajdonságait helyezi előtérbe és modellezi. Találkozott olyan irodalommal, ahol a H-B karakterisztikát alkalmazzák? Ha nem, mit gondol a H-B karakterisztika alkalmazásáról?*

A kérdés a szupravezető-modellezés területének egyik érdekességét, furcsaságát hozza felszínre, ugyanis a gyakorlatban a közeg leírására két, látszólag teljesen független megközelítést használnak: a szupravezető modellezhető egyfelől vezető anyagként a nemlineáris E - J karakterisztikával, másfelől mágneses anyagként a nemlineáris, hiszterézises H - B karakterisztikával. Azonban belátható, hogy a két leírás ekvivalens: az egyértékű E - J karakterisztikát az indukciótörvénnyel kombinálva, a mágneses térre olyan nemlineáris diffúziós egyenletet kapunk, amelynek megoldása meredekségfüggő (*rate-dependent*) hiszterézis eredményez [4-5] (ezt a dolgozatban is említtem, habár hivatkozás nélkül). Mivel a hiszterézis implementálása a véges elem-módszerben távolról sem egyszerű feladat [2], ez megmagyarázza, hogy miért az E - J modell terjedt el jóval szélesebb körben. Mindazonáltal TDK konzulensként korábban magam is foglalkoztam a mágneses hiszterézis alapú szupravezető-modellel [6].

Átfogó kérdés

Mivel hiányzik a záró fejezet, megkérdezem, hogy a Szerző milyen irányban folytatja tudományos tevékenységét, az itt bemutatott módszereket hogyan kívánja a jövőben felhasználni, alkalmazni.

Mind a vezeték nélküli energiaátvitellel, mind a szupravezető szalagtekercsrel kapcsolatos kutató-fejlesztő munka máig folyamatos a dolgozatban említett ipari partnerekkel. A szalagtekercs spirálisan homogenizált modelljét időközben a H formalizmussal is sikerrel implementáltuk; ennek eredményeképpen TDK és OTDK helyezés született [7]. A mozgó közeg ekvivalens nyugvó közeggel történő helyettesítése megjelenik az egyetemi oktatásban, többek között a „Relativisztikus elektrodinamika”, a „Mezőszimuláció véges elem módszerrel”, és az „Elektromágneses terek szimulációja” című tárgyak keretében.

Hivatkozások

- [1] C. R. Sullivan and R. Y. Zhang. „Analytical model for effects of twisting on litz-wire losses”. In: IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). Santander, Spain, 22-25 June 2014, pp. 1–10.
- [2] M. Kuczmann and A. Iványi. *The finite element method in magnetics*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2008.
- [3] *COMSOL Multiphysics Reference Manual*. v5.2. Comsol Ab, 2015.
- [4] I.D. Mayergoyz. *Nonlinear Diffusion of Electromagnetic Fields*. Academic Press, New York, USA, 1998.
- [5] Mårten Sjöström, *Hysteresis Modelling of High Temperature Superconductors*, PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, 2001, pp. 38-39.
- [6] Falvy Bence, *Szupravezető anyagok modellezése véges elemes mezőszámításban*, BME-VIK TDK Konferencia, 2004.
- [7] Kenderes Anett, *Szupravezető szalagtekercsek kritikus árammodellje homogenizálás alkalmazásával*, 35. OTDK, Műszaki tudományok szekció, 2021. (II. helyezés)

Budapest, 2021. június 21.


Dr. Gyimóthy Szabolcs