

Bírálat

Kuczmann Miklós

Ferromágneses hiszterézis az elektromágneses térszámításban

című MTA doktori értekezéséről

A ferromágneses hiszterézis jelensége számos villamosmérnöki alkalmazásban játszik kiemelkedő szerepet. Különösen a villamos gépekben használt lemezezt vastestek viselkedésének vizsgálatakor nem elhanyagolható a hiszterézis. A jelenség matematikai modellezése ezért igen fontos tudományos probléma, amelynek számos részletkérdése tisztázásra vár. Kiváltképp igaz ez a ferromágneses hiszterézis kezelésére numerikus térszámítási algoritmusok keretein belül. A szakirodalomban alig található olyan munka, amely a mágneses hiszterézist figyelembe vevő térszimulációról szólna. Ennek elsősorban az az oka, hogy a hiszterézis jelenségének matematikai leírására szolgáló modellek igen számításigényesek, és egy adott diszkretizált elrendezésben rendkívül nagy számú, esetenként több százezer vagy akár több millió ilyen modell beillesztésére lehet szükség. Ennek alapján megállapítható, hogy **az értekezés célkitűzése**, azaz gyors működésű hiszterézismodellek kidolgozása, és azok numerikus térszimulációs eljárásokba történő beépítése, **jelentős és megoldásra váró tudományos feladatokat ölel fel**.

A jelölt mintegy 100 oldalas értekezést nyújtott be, amelynek egy fejezete a szakirodalom áttekintését adja, három fejezete pedig a szerző tudományos eredményeit közli. Az ezen kívüli bevezető és összefoglaló részek a mű keretét adják, illetve a függelékben további részleteket közölnek, így a bírálóban az említett négy fejezet elemzésére szorítkozom.

Az irodalmi összefoglalóban a jelölt a ferromágneses hiszterézis talán legjelentősebb leírási módját, a Preisach-modellt és paramétereinek méréssel történő meghatározását tárgyalja. Ezen kívül röviden összefoglalja a vonatkozó Maxwell-egyenletekből következő potenciálleírásokat és az azok numerikus megoldására alkalmas legfontosabb eljárást, a végeselem-módszert. A fejezetben szerepelnek az értekezés szempontjából lényeges eredmények. Sajnos a leírásba néhány tisztázandó pontatlanság csúszott, amelyeket alább felsorolok:

- 1.1 A (2.4) képletben a $H(t)$ függvény szerepe nem világos. Úgy tűnik, mintha a $\hat{\gamma}(\alpha, \beta)$ függvényt $H(t)$ -vel kellene szorozni, pedig arról van szó, hogy $H(t)$ határozza meg α -t és β -t. Megfelelőbb a $\hat{\gamma}(\alpha, \beta)[H(t)]$ forma.
- 1.2 A (2.9) képletben a W jelölés szokatlan a veszteségre (W inkább energiát jelöl). Itt teljesítménysűrűségekről van szó, amelyeket p -vel szokás jelölni.
- 1.3 A (2.12)-ben szereplő R paraméter nem nevezhető mágneses ellenállásnak, amely a gerjesztő áram és a fluxus hányadosa egy mágneses hálózatban. A [93] irodalomban a „dynamic magnetic resistivity” kifejezés szerepel, amely dinamikus fajlagos mágneses ellenállásnak fordítható, de fizikailag inkább egy fajlagos mágneses vezetőképesség.
- 1.4 Nem világos, hogy mi az összefüggés (2.11) és (2.14) között, ezek formailag ellentmondanak egymásnak.

- 1.5 Nem világos, hogy a 14. oldalon a (2.21) képletet követően milyen izotróp anyagról van szó, amely anizotrópiával bír (akkor nem izotróp). Ez a további fejezetekben is előfordul.
- 1.6 A (2.22) egyenletben az eltolási áramsűrűség hiányzik, bár ez mint egy Maxwell-egyenlet szerepel. Később említi az értekezés, hogy az egyenletekben a szerző az eltolási „áramot” (tkp. áramsűrűséget) elhanyagolta. Ez természetesen a vizsgált esetekben megfelelő, de (2.22) felírásakor nem helyes Maxwell-egyenletről beszélni.
- 1.7 A 20. oldalon szereplő $\vec{K}(\vec{r}, t)$ függvény nem felületi áram, hanem felületi áramsűrűség.
- 1.8 A (2.28)-ban szereplő $\vec{T}_0$ áram-vektorpotenciál nem feltétlenül egyezik meg a μ_0 permeabilitású közegben fellépő mágneses térerősséggel. Ellenkezőleg, legtöbbször célszerű $\vec{T}_0$ -t úgy választani, hogy az ne egyezzen meg a Biot-Savart törvényből számítható mágneses gerjesztettséggel. Erre jó példa az értekezés 5.1 pontja.
- 1.9 A 2.3.2 pontban közölt vektorpotenciál-formalizmusok leírásánál legtöbbször először az egyetlen releváns szabad formalizmus szerepel, a kötött formalizmust (amelynek numerikus realizálása problematikus) csak másodjára említi a szerző. Nem világos, hogy a statikus esetben bevezethető mágneses vektorpotenciál esetén miért került a kötött formalizmus első helyre, azt a látszatot keltve, hogy ez a lényegesebb kezelési módszer.
- 1.10 A 30. oldalon szereplő megállapítás a közelítő formafüggvényekről nem helytálló, azok tartója nem egyetlen végeselem, hanem azon végeselemenek halmaza, amelyekben a megfelelő csomópont (vagy él) szerepel (ld. a (iii) pontot a 31. oldalon).
- 1.11 A 32. oldal első bekezdésében szereplő megállapítás, miszerint a mágneses vektorpotenciál az „eredmények” tanúsága szerint nem folytonos, nem helytálló. Arról van szó, hogy amennyiben a normális komponens folytonosnak választjuk (ami a kötött formalizmus esetén kötelező), akkor a végeselem-formafüggvényekkel nem közelíthető meg a megoldás.

A fenti kérdések tisztázása után az **irodalmi összefoglalást elfogadom**.

A 3. fejezetben a jelölt az értekezés első tézisét alkotó eredményeit részletezi. A skalár hiszterézis karakterisztika mérésére általa kidolgozott módszer hatékony, és a zajszűrés megvalósításával, továbbá a mágneses indukció időfüggvényének szabályozásával potenciálisan pontos mérési eredményekre vezet. Egy tisztázásra váró kérdés marad:

2.1 Mi az oka annak, hogy a szerző által mért veszteségek nagyobbak a gyártó által közölt adatoknál (ld. a 3.6 ábrát, ill. a 38. oldalon szereplő megállapítást)?

A skalár hiszterézis karakterisztika modellezésére kidolgozott eljárás a modell dinamikus kiterjesztésével az irodalomhoz képest új eredmény. A modell identifikációja és verifikációja sikeres. A leírással kapcsolatban két ponton szükséges pontosítás:

- 2.2 A (3.5) és (3.6) képletek tanúsága szerint az Everett-függvény dimenziótlan értékeket vesz fel. Ennek ellentmondanak az irodalmi összefoglalóban szereplő (2.7) és (2.8) képletek, amelyek szerint az Everett függvény dimenziója a mágneses indukciójával egyezik meg.
- 2.3 A 41. oldalon szereplő $R_0=23,79$ érték nem értelmezhető az egység megadása nélkül. Ld. az 1.3 kérdést is.

A vektor hiszterézis mérésére és általánosítására kidolgozott módszer véleményem szerint a dolgozat legértékesebb része. A zajszűrés fontossága itt is igen nagy, a szabályozó algoritmusok szerepe kiemelendő. A közölt mérési eredmények a tudományos közélet számára fontos referenciaként szolgálhatnak. Újszerű a forgó mágneses mező következtében fellépő folyamatok figyelembe vétele. A modell identifikációja és verifikációja igazolja annak helyességét. A fenti kérdések megválaszolása után az értekezés **1. téziséét új tudományos eredményként fogadom el.**

Az értekezés 4. fejezete a 2. tézisben összefoglalt eredmények leírását tartalmazza. A fixpontos technika hiszterézis típusú nemlineáris végeelem-problémák megoldására előnyös más módszerekkel szemben, hiszen nem szükséges sem a nemlineáris karakterisztika differenciálása, sem pedig a végeelem-mátrixok ismételt kiszámítása az egyes nemlineáris iterációk során. A polarizációs módszer kiválóan alkalmas a mágneses hiszterézis kezelésére. Értékes új eredmény a polarizációs technika alkalmazása a különböző ismert potenciál-formalizmusokra. Ezzel lehetővé válik a ferromágneses hiszterézis modellezésének beillesztése a végeelem módszeren alapuló numerikus térszimulációs eljárásokba. A direkt, ill. inverz Preisach-modell megfelelő választásával potenciálisan gyors algoritmusok fejleszthetők ki. Ezen fejezettel kapcsolatban a következő tisztázandó kérdéseket látom:

- 3.1 A (4.9) képletben szereplő $\vec{H}_{jár}$ tag kiszámításának módja magyarázatra szorul. Különösen ezen képlet kapcsolata a (2.11), (2.14), ill. (3.7) kifejezésekkel nem világos.
- 3.2 A (4.64) és (4.74) képletek hivatkozás nélküli közlése az optimális fixpont-reluktivitás, ill. -permeabilitás választására magyarázatra szorul. Ezzel kapcsolatban megjegyzem, hogy az optimális fixpont-reluktivitás, ill. -permeabilitás a végeelem-módszer realizálása során nem szükségképpen állandó érték a teljes diszkretizált geometriai tartományon. Például a [B1] hivatkozás egy jóval általánosabb eredményt közöl az optimális választásra.
- 3.3 Miért nem foglalkozott a szerző a direkt hiszterézis modell frekvenciafüggő kiterjesztésével (ld. a 69. oldalon, a 4.4.2 pont első mondatát)?

A fenti kérdések tisztázása után az értekezés **2. téziséét új tudományos eredményként fogadom el.**

Az értekezés 5. fejezete a „Villamos tervezés hiszterézismodell figyelembevételével” címet viseli, ami arra utal, hogy a kidolgozott módszerek közvetlenül alkalmazhatók a villamosmérnöki gyakorlatban, illetve a numerikus szimuláció során. Ennek alátámasztására a szerző öt általa elvégzett számítógépes végeelem-szimuláció rövid leírását közli. Sajnos ezek a leírások túlságosan szűkszavúak, és nem teszik lehetővé azt, hogy más kutatók újra elvégezzék azokat. Így nem alkalmasak arra, hogy bebizonyítsák azt, hogy az első két tézisben kidolgozott módszerek valóban képesek azon nyitott tudományos kérdés megválaszolására, hogy hogyan alkalmazhatóak a hiszterézismodellek bonyolult, háromdimenziós mérnöki szimulációs feladatok numerikus megoldására. Az alábbiakban felsorolom, milyen hiányosságokat látok az ebben a fejezetben közölt eredményekben:

- 4.1 Az 5.1 pontban közölt eljárás potenciálisan értékes. Sajnos az (5.3) peremfeltétel nem releváns az adott probléma esetén, helyette a $(\nabla \times \vec{T}_0) \times \mathbf{n} = \mathbf{0}$ peremfeltételt kell előírni. Ez utóbbi az operátor természetes peremfeltétele, így azt az (5.4) funkcionál minimalizálásakor nem kell figyelembe venni.
- 4.2 Az 5.2 pontban szereplő feladat egydimenziós, így nem alkalmas arra, hogy a kidolgozott módszerek hatékonyságát igazolja. Az (5.9) képletben szereplő $\vec{H}_{exc}$

kifejezés itt fordul először. Talán ez ugyanaz mint a 3.1 kérdésben szereplő $\vec{H}_{\text{jár}}$, de akkor vonatkozik rá az ott tett megjegyzés. A 76. oldalon szereplő megjegyzés arról, hogy a mágneses fluxus előírása Neumann-típusú peremfeltétellel történhetne, nem helytálló. A H_y -ra vonatkozó Neumann-típusú peremfeltétel az elektromos térerősség E_x x -irányú komponensének előírását jelentené. Nem világos, hogy az 5.4 ábra milyen B - H karakterisztikára vonatkozik. Végül zavaró, hogy a 78. oldal utolsó bekezdésében egy új, alig definiált probléma megoldása kerül elő.

- 4.3 Az 5.3 pontban közölt probléma leírása igen szükséges. Nem világos, hogy mit kíván ez az egyszerű kétdimenziós feladat illusztrálni. Mit jelent az „egy-egy független inverz tangens típusú nemlinearitás”? Miért „nyilvánvaló”, hogy Preisach-modell szolgáltatja a legpontosabb eredményeket? Semmilyen verifikációs eredményt nem közöl a szerző.
- 4.4 Az 5.4 pontban leírt példa még szükségesebb (ábrákkal együtt egy oldal). Nem világos, mi igazolható ezekkel az eredményekkel.
- 4.5 Az 5.5 pontban szereplő TEAM probléma nem alkalmas hiszterézis típusú anyagjellemzőjű feladatok vizsgálatára, hiszen hiszterézismentes jelleggörbét definiál. Nem áll rendelkezésre összehasonlító eredmény, amely a hiszterézismodellek ellenőrzését lehetővé tenné, így az 5.15 ábra jelentősége kicsi.
- 4.6 Az 5.6. pontban közölt példa, lévén kétdimenziós, megintcsak nem alkalmas a várt eredmény elérésére. Az itt közölt eredményeket a szerző felhasználta az 1. tézishez elvégzett verifikáció során, így önálló, új eredményekként azok nem értékelhetők.

A fentiek alapján az értekezés **3. tézisét nem fogadom el új tudományos eredményként.**

Összefoglalva, a doktori művet **nyilvános vitára alkalmasnak tartom**, és javaslom annak kitűzését.

Bíró Oszkár
az MTA doktora

2015. május 15.

[B1] G. Koczka, S. Außerhofer, O. Bíró, K. Preis, “Optimal Convergence of the Fixed-Point Method for Nonlinear Eddy Current Problems,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 3, pp. 948-951, March 2009.