



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2
BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VILLAMOSMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
VILLAMOS ENERGETIKA TANSZÉK

**MAGASHŐMÉRSÉKLETŰ SZUPRAVEZETŐS ESZKÖZÖK NUMERIKUS
MODELLEZÉSE**

PhD értekezés tézisei

TIHANYI VIKTOR ROLAND

TÉMAVEZETŐ:

DR. VAJDA ISTVÁN
EGYETEMI TANÁR

BUDAPEST, 2011

1. Bevezetés

A különböző numerikus számítási módszerek használata a mérnöki tervezésben ma már szinte elengedhetetlen. Az előforduló geometriai sokféleség, az anyagi nemlinearitások, tranziens folyamatok megfelelő minőségű vizsgálatához az analitikus módszerek nem adnak megfelelő támpontot. A numerikus térszámítás lehetőséget nyújt mindezen jelenségek együttes számításához.

A kereskedelemben forgalmazott térszámító szoftverek legtöbbje egyáltalán nem, néhány csak erősen korlátozottan képes a szupravezető anyagok kezelésére. Mindezek alapján két lehetőség van a szupravezetős alkalmazások szimulációjára: használhatunk kereskedelmi szoftvert, mely a felhasználói felületen túl alkalmas külső programozásra, melynek előnye, hogy a térszámítási módszerek nehézségeinek többségét elrejtí elölünk, hátránya, hogy könnyen korlátokba ütközhetünk. A másik lehetőség teljesen saját program fejlesztése, melynél nyilvánvalóan az összes térszámítással kapcsolatos problémával meg kell küzdeni, azonban a kód bármely részén tudunk változtatni, így a beavatkozási lehetőségeink sokkal kevésbé korlátosak. Mindegyik általam kidolgozott modellezési módszerhez saját térszámító programot készítettem.

A doktori munkám fő célja szupravezető anyagokat, alkatrészeket tartalmazó elektrotechnikai alkalmazások, szupravezetős csapágyak, zárlati áramkorlátozók és önkorlátozó transzformátorok olyan modellezési módszereinek kidolgozása, melyek segítséget nyújtanak ezen eszközök tervezésében.

Az induktív típusú MHS zárlati áramkorlátozók, önkorlátozó transzformátorok analíziséhez mindenképpen tranziens szimulációt kell végezni, mely a szupravezető anyag különleges viselkedésének és ezen alkalmazásokban a határokig történő kihasználásának következtében összetett, multifizikális jellegű kell, hogy legyen. Az elektromágneses jelenségeken felül mindenképp figyelembe kell venni a termikus hatásokat is. A modellezéshez a csatolt véges elemes módszert alkalmaztam, melyhez saját kódot fejlesztettem. A szimulációban közvetlenül csatolt 2D mágneses véges elemes és hálózati modell, továbbá ezekhez szekvenciálisan csatolt 3D termikus modell található.

A MHS lebegtetett csapágyak esetében a szimulációk a lebegtetési erők, mechanikai merevség számítására korlátozódtak. Ezen mennyiségek számításához speciális statikus szimulációt végeztem. A számításokhoz kidolgoztam egy saját, valós fizikai jelenségeket tükröző modellt, mely megfeleltethető az ismert kritikus állapot modellel. A modell megvalósításához a véges differenciák módszerét alkalmazó programokat készítettem, az

egyik 2D-ben a másik 3D-ben számol. A véges differenciák módszere jól illeszthető a modellhez.

Az általam végzett szimulációs munka szorosan kapcsolódik a BME Villamos energetika tanszéken végzett szupravezetős eszközök kísérleti kutatásaihoz, ezáltal lehetőség volt minden esetben a szimulációs eredményeket valós MHS eszközökön végzett mérések eredményeivel összevetni.

2. Motiváció

Az általános iskolában már nagyon érdekelt a programozás és a fizika, melyből leginkább a villamos hálózatok számítása fogott meg. A középiskolában tovább fejlesztettem a programozói tudásomat, számtalan programot írtam saját szórakoztatásomra. Egyértelművé vált számomra, hogy a villamosmérnöki pályát szeretném választani. Az egyetemen az alapképzés elvégzése után azonnal bekapcsolódtam a Villamos Energetika Tanszéken folyó szupravezetős kutatásokba. Mivel az elektromágneses terek numerikus számítása szintén komolyan érdekelt, első feladatként rögtön az MHS csapágycsapatok mágneses térszámítását választottam. A Villamos Gépek és Hajtások szakirányon végeztem, a szupravezető eszközök numerikus térszámításán kívül elmélyedtem a forgógép tervezésben, melyben rengeteg előnyt jelentett az elektromágnesség elmélyült ismerete. Elkezdtem foglalkozni villamos hajtásokkal és teljesítményelektronikával szintén. Három alkalommal készítettem TDK dolgozatot. A diploma után három évig doktorandusz voltam a Villamos Energetika Tanszéken. Ez idő alatt folytattam az MHS alkalmazások numerikus modellezését kutatási témaként. Mellette részt vehettem egy profi tervező cég, a H-TEC. Kft munkájában, ahol villamos forgógépek tervezésével és analízisével foglalkoztam. A három év leteltével ennél a cégnél helyezkedtem el forgógép tervezőként. Idő közben néhány barátommal alapítottunk egy sportegyesületet (EV-Sport Mo. Autosport Egyesület), melyben elektromos versenyautók építésével foglalkozunk szabadidőnkben. Ennek keretében villamos motorok, hajtások tervezésével, programozásával és kivitelezésével foglalkoztam.

Számomra a villamosmérnöki tudományokkal kapcsolatos kutatás, fejlesztés, tervezés, kivitelezés nemcsak munka, hanem egyben hobbi, játék és kellemes szabadidőtöltés.

3. A kutatás módszertana

A magashőmérsékletű szupravezetős anyagok, eszközök numerikus modellezése egy jelentős terület a numerikus térszámításhoz kapcsolódó kutatásokban. Mindegyik általam fejlesztett számítási módszer, modell megvalósításához, ellenőrzéséhez saját fejlesztésű numerikus

kódot készítettem. Az elméleti modelleket és eljárásokat csak abban az esetben lehetséges hatékonyan kidolgozni, amennyiben ismerjük az összes ehhez kapcsolódó elméleti és számítástechnikai jellegű térszámítási problémát. A térszámító programok elkészítése önmagában is nagyon összetett feladat, sok esetben kell megoldani olyan konkrét problémákat, melyek részleteiben sokszor nincsenek kidolgozva az elérhető irodalmakban. Az elkészített részegységeket (mágneses, hálózati, termikus) egyenként ellenőriztem, több kereskedelemben elérhető szoftverrel összevettem a számított eredményeket különböző geometriai stb.. elrendezésre. A végleges, MHS anyagmodelleket tartalmazó számítások ilyen jellegű ellenőrzésére természetesen nem volt lehetőségem, hiszen ezek olyan egyedi modellek, melyek nem érhetőek el a kereskedelemben kapható, vagy bármely más szoftverben. A kutatási munkám szorosan kapcsolódik a BME Villamos energetika tanszéken végzett kísérleti szupravezetős eszközök (MHS csapágyak, zárlati áramkorlátozók) kutatásához, ezáltal lehetőség nyílt minden esetben a számítások eredményeinek valós eszközökön végzett mérésekkel való összevetésére. A számítási eljárásokkal, modellekkel, térszámító programokkal kapcsolatos elvárásokat, követelményeket is az eszközök tervezési/fejlesztési problémái, kísérleti mérései és tapasztalatai alapján alakítottuk ki.

4. Az eredmények hasznosítása, felhasználása

Az általam végzett kutatások eredményei olyan alkalmazások numerikus szimulációjához kapcsolódnak, melyek önmagukban is a kutatás stádiumában vannak. Az eredmények közvetlen alkalmazása az ipari tervezésben ebből adódóan jelenleg nem elérhető. Az általam kidolgozott modellek, szimulációs technikák továbbfejlesztése, további kutatása mindenképpen lehetséges.

5. Új tudományos eredmények összefoglalása

- Létrehoztam egy új numerikus modellezési eljárást, mely alkalmas MHS gyűrűk tranziens csatolt véges-elem modellezésére, mely magába foglal 2D mágneses véges-elem, 3D termikus véges-elem és elektromos hálózati modellt. Implementáltam az MHS E-J karakterisztikájából származó nemlinearitást a numerikus szimulációba, ezzel lehetővé tettem, hogy a kiadódó nemlineáris egyenleteket a Newton-Raphson iterációs eljárással oldjam meg. A szimulációban a vasmag nemlinearitását is figyelembe vettem. A numerikus megvalósításhoz 2 módszert dolgoztam ki a csatolt mágneses és termikus egyenletet szimultán megoldásához. [1], [12], [13].

- A kidolgozott modellezési módszer segítségével szimulációkat végeztem MHS ZÁK és MHS önkorlátozó transzformátorokon. A szimulációval kimutattam az egyes esetekben a melegedési folyamatok hatását a supra-normál átmenetre, ezáltal az eszköz működési karakterisztikáira, kitüntetetten az áram korlátozásának folyamatára. A számításaimat mérésekkel validáltam, a mérési eredmények mind a folyamatok jellegét, mind számszerűségét kielégítő hűséggel és pontossággal igazolták. [1], [12], [13].
- A szupravezető kritikus állapotára vonatkozó saját fizikai anyagmodellt és annak matematikai leírását dolgoztam ki, mely alkalmas statikus mágneses térbeli számításra FC és ZFC hűtésnél egyaránt, továbbá képes kezelni a szupravezetőben létrejövő fluxus átrendeződést és ezáltal a jellegzetes hiszterézises viselkedést lassú változások esetére. A modell jól illeszthető a véges differenciák módszeréhez, melynek alkalmazását 2D és 3D esetre is kidolgoztam. Kimutattam a saját modellem és az ismert kritikus állapot modell közötti megfelelést. [9], [10], [11].

6. Publikációk jegyzéke

- [1] Tihanyi V, Vajda I, Györe A „Multiphysical finite element modeling of inductive type fault current limiters and self limiting transformers”IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY 19:(3) pp. 1922-1925. (2009)
- [2] Viktor Tihanyi,István Vajda (szerk.), XVI. Technical Report for E.ON Nordic: „Modeling of fault current limiters with FEM”BME VET(2007)
- [3] Gyore A, Semperger S, Tihanyi V, Vajda I, Gonal MR, Muthe KP, Kashyap SC, Pandya DK, „Experimental Analysis of Different Type HTS Rings in Fault Current Limiter.”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY 17:(2) pp. 1899-1902. (2007)
- [4] Viktor Tihanyi, István Vajda (szerk.), XV. Technical Report for E.ON Nordic: „Modeling of fault current limiters.”, BME VET(2006)
- [5] Viktor Tihanyi, István Vajda (szerk.),XIV. Technical Report for E.ON Nordic: „Modeling of fault current limiters with FDM”, BME VET (2006)
- [6] Tihanyi Viktor, Vajda István (szerk.), Új technikák alkalmazása kis-és középfeszültségű hálózatok zárlati áramának korlátozásában: „Szupravezetős induktív

- típusú zárlati áramkorlátozó 2D modellezése” Kutatási jelentés, EON-Északdunántúli Áramszolgáltató Zrt. , BME VET (2006)
- [7] Tihanyi Viktor,Vajda István (szerk.), Új technikák alkalmazása kis-és középfeszültségű hálózatok zárlati áramának korlátozásában: „Szupravezető anyagok és tulajdonságaik”, Kutatási jelentés, EON-Északdunántúli Áramszolgáltató Zrt, BME VET (2005)
- [8] Tihanyi Viktor,Vajda István (szerk.), Új technikák alkalmazása kis-és középfeszültségű hálózatok zárlati áramának korlátozásában: „Hálózatba illesztett szupravezetős induktív típusú zárlati áramkorlátozó elméleti modellezése”, Kutatási jelentés, EON-Északdunántúli Áramszolgáltató Zrt. , BME VET (2005)
- [9] Kohari Z, Tihanyi V, Vajda I, „Loss Evaluation and Simulation of Superconducting Magnetic Bearings”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY 15:(2) pp. 2328-2331. (2005)
- [10] Viktor Tihanyi, István Vajda (szerk.), XII. Technical Report for SYDKRAFT AB R&D DEPARTMENT: „Modeling superconducting bearings with finite difference method”, BME VET, (2004)
- [11] Viktor Tihanyi, István Vajda (szerk.), X. Technical Report for SYDKRAFT AB R&D DEPARTMENT: „Magnetic field simulation of superconducting bearings in 3D”, BME VET, (2003)
- [12] Tihanyi Viktor, Vajda István (szerk.), SZUPRAVEZETŐS ZÁRLATI ÁRAMKORLÁTOZÓ FEJLESZTÉSE: „Szupravezetős induktív típusú zárlati áramkorlátozó multifizikális véges elemes modellezése” Kutatási jelentés, EON-Hungária Zrt. , BME VET (2008)
- [13] Tihanyi Viktor, Vajda István (szerk.), SZUPRAVEZETŐS ZÁRLATI ÁRAMKORLÁTOZÓ FEJLESZTÉSE ÉS NAGYFORDULATSZÁMÚ, ÁLLANDÓMÁGNESES MIKRO-TURBINA GENERÁTOR FEJLESZTÉSE: „magashőmérsékletű szupravezető huzallal ellátott induktív zárlatiáram-korlátozós szimulációs programjának fejlesztése” Kutatási jelentés, EON-Hungária Zrt. , BME VET (2010)

Fontosabb előadások

- [1] Tihanyi Viktor, A százéves szupravezetés az alkalmazások tükrében: „Modellezés és szimuláció: alkatrészek és eszközök”, Szóbeli előadás, MTA Műszaki Tudományok Osztályának tudományos ülése, 2011.11.10
- [2] Tihanyi viktor, „Comparison of different HTS models used in finite element calculations of inductive type superconducting fault current limiters”, The Seventh Japanese-Mediterranean and Central European Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano Materials, Poszter előadás, 2011.07.08
- [3] Tihanyi Viktor, Erősáram a fiatalok szemével: „Magashőmérsékletű szupravezető zárlati áramkorlátozók és önkorlátozó transzformátorok csatolt véges elemes modellezése”, Szóbeli előadás, BME, 2010.04.07